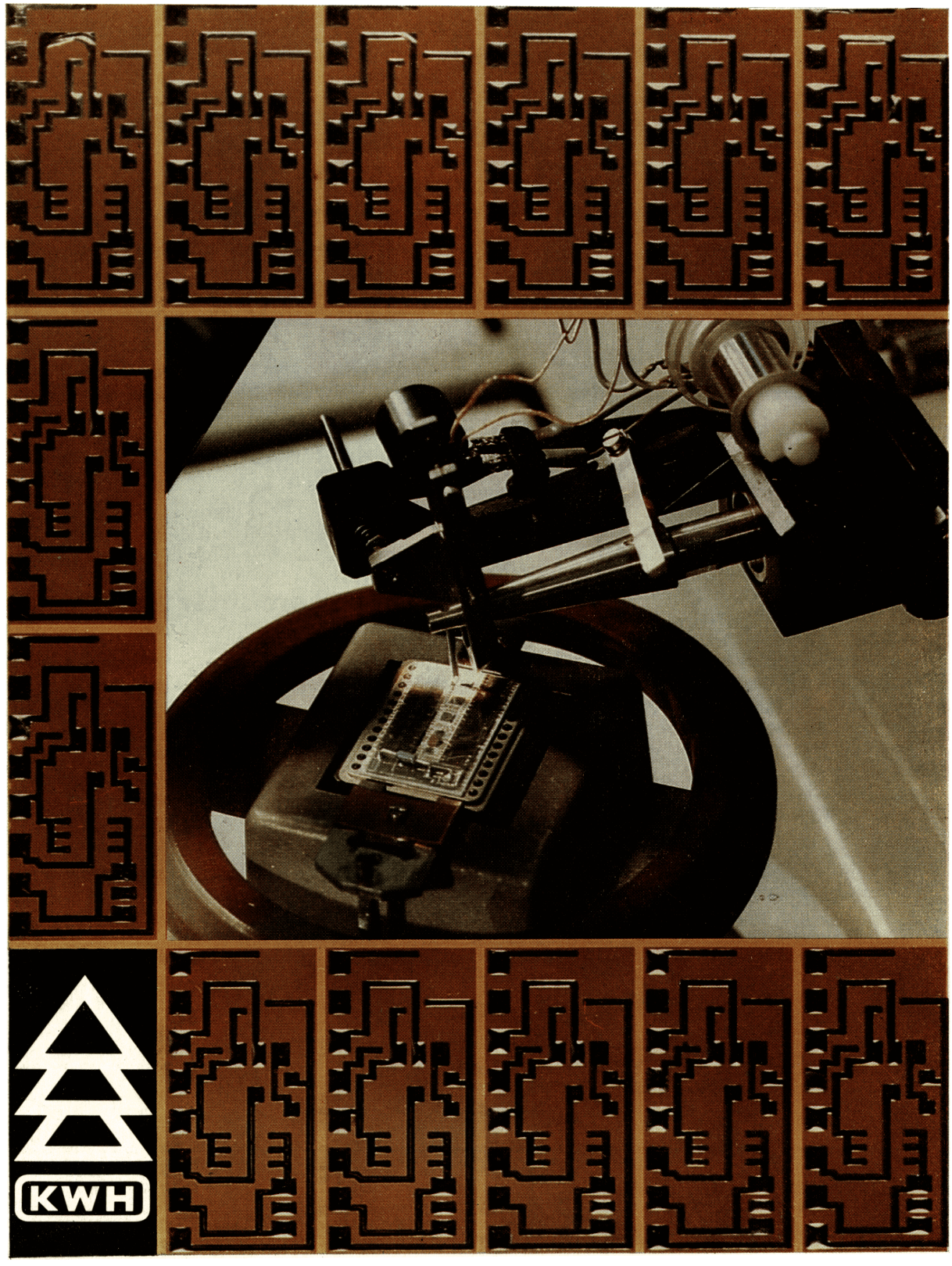
ELEKTRIE 6|84

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN · Postverlagsort für DDR Leipzig · EVP 2,50 Mark · ISSN 0013–5399



0120312

Lieferbar in bearbeiteten Auflagen

Elektrische Maschinen

Berechnung rotierender elektrischer Maschinen
Von Prof. Dr. sc. techn. Karl Vogt.
3., bearbeitete Auflage. 500 Seiten, 335 Bilder, 50 Tafeln, Kunstleder, 36,— M, Ausland 45,— M.
Bestellangaben: 5532107/Vogt, Berechnung

Die Auflage entspricht in allen Teilen dem neuesten Stand in Wissenschaft und Technik. Es erfolgten u.a. eine Überarbeitung der Werte für elektromagnetische Beanspruchungen, die Aufnahme des Entwurfs von Kleinmaschinen einschließlich des Entwurfs magnetischer Kreise mit Permanenterregung, die Behandlung von Gesichtspunkten zum Entwurf dynamisch hochwertiger Gleichstrommaschinen sowie des Einflusses volkswirtschaftlicher Forderungen beim Entwurf hinsichtlich Energie-, Fertigungs- und Materialökonomie. Besonders hinzuweisen ist auf die zahlreichen Berechnungsbeispiele ausgeführter moderner Maschinen mit Angabe ihrer Kennwerte und Abmessungen.

Grundlagen der elektrischen Antriebstechnik mit Berechnungsbeispielen

Von Prof. Dr. sc. techn. Johannes Vogel u.a.
3., bearbeitete Auflage. 404 Seiten, 274 Bilder, 51 Tafeln, Kunstleder, 25,50 M, Ausland 40,— M.
Bestellangaben: 5530654/Vogel, El. Antriebstechnik

Vermittelt werden die Grundlagen der elektrischen Antriebstechnik in anwendungsbezogener Form. An über 100 Berechnungsbeispielen wird die Anwendung der gesetzmäßigen Zusammenhänge auf die Praxis demonstriert, und es werden die vom Ingenieur zu treffenden Entscheidungen nach technisch-ökonomischen Zielsetzungen verdeutlicht.
Die Bearbeitung des Buches hat zu einer inhaltlichen Aktualisierung des Stoffes geführt. Das betrifft u.a. die rationelle Energieanwendung, den Einsatz moderner Leistungstransistoren, Antriebe für Industrieroboter und mit Linearmotoren, die Dynamik des elektromotorischen Antriebs und die Einsatzmöglichkeiten der Mikroelektronik.

Auslieferung durch den Fachbuchhandel

Prozeßrechentechnik

Automatisierte Systeme mit Prozeß- und Mikroprozeßrechnern
Von Prof. Dr. sc. techn. Wolfgang Fritzsch.
2., stark bearbeitete Auflage. 364 Seiten, 205 Bilder, 38 Tafeln, Leinen, 28,— M, Ausland 40,— M.
Erscheint in diesen Tagen.
Bestellangaben: 5533425/Fritzsch, Prozeß

Das Buch zeigt den Prozeß- und Mikroprozeßrechner als leistungsfähiges Automatisierungsmittel in der Anwendung und vermittelt auf praktische Gegebenheiten ausgerichtetes Grundlagenwissen. Die Auflage berücksichtigt sowohl den gerätetechnischen Generationswechsel als auch die erweiterte Anwendung auf den verschiedensten Gebieten.

Infrarotmeßtechnik

Von Prof. Dr.-Ing. Ludwig Walther
und Prof. Dr.-Ing. Dietrich Gerber.
Reihe Meßtechnik. 2., bearbeitete Auflage. 252 Seiten, 190 Bilder, 37 Tafeln, Kunstleder, 35,— M.
Bestellangaben: 5532035/Walther, Infrarotmeßt.

Vermittelt werden neben physikalischen Grundlagen Kenntnisse über die wichtigsten Meßverfahren und Meßgeräte. Charakteristische Anwendungsfälle vertiefen den Stoff. Mit diesem Buch ist auch dem Nichtfachmann ein Eindringen in das Fachgebiet möglich.

In zweiter, durchgesehener Auflage

Industrieroboter

Herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. habil. Johannes Volmer.
Erarbeitet von einem Autorenkollektiv.
236 Seiten, 163 Bilder, 45 Tafeln, Leinen, 25,— M, Ausland 32,— M.
Bestellangaben: 5529100/Volmer, Roboter

Dieses Buch ermöglicht solide Grundkenntnisse über den mechanischen Aufbau von Industrierobotern, die wichtigsten Baugruppen und deren Funktionsprinzipien, über den Aufbau der Steuerungen, Sensoren, Einsatzvorbereitung, Ermittlung des Nutzeffektes u.a.

VT

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

6|84 ELEKTRIE

38. Jahrgang

Wissenschaftlich-technische Zeitschrift der Elektrotechnik

ISSN 0013-5399

Organ des Fachverbands Elektrotechnik der Kammer der Technik

Die Zeitschrift erhielt die Silberne Plakette der KDT

Redaktionsbeirat

Vorsitzender:

Prof. Dr. sc. techn. J. Vogel

Mitglieder:

Prof. Dr. sc. techn. S. Altmann · Prof. Dr. sc. techn. H. Böhme · Prof. Dr. sc. techn. P.-K. Budig · Dr. sc. techn. G. Burkhard · Dr.-Ing. D. Flügge · Obering. K. Friedel · Dipl.-Ing. H. Kabisch · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Lappe · Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. e. h. H.-J. Mau · Prof. Dr. phil. habil. G. Mierdel · Dr. rer. nat. K. Möbius · Prof. Dr. sc. techn. E. Muschick · Prof. Dr. sc. techn. V. Pfeiler · Prof. Dr.-Ing. e. h. K. Pommer · Prof. Dr.-Ing. habil. R. Schönfeld · Obering. Dipl.-Ing. N. Wass

Korrespondenten:

Dr.-Ing. K. Hanella, Ilmenau · Dr.-Ing. W. Jordan, Dresden · Dipl.-Ing. W. Knuth, Berlin

Titelbild

Die Weiterentwicklung und wissenschaftliche Durchdringung bekannter technologischer Grundprinzipien gewinnen angesichts der ständig steigenden Forderungen nach erhöhter Arbeitsproduktivität immer größere Bedeutung. Eine besondere Rolle spielen dabei die Verfahren der Elektrotechnologie, sind doch hier Steigerungen bis zum 10fachen gegenüber herkömmlichen Technologien erreichbar.

Die breite Nutzung der Möglichkeiten der Mikroelektronik zur Optimierung elektrotechnologischer Prozesse — eines der Hauptthemen dieses Heftes — läßt weiter erhebliche Energie- und Materialeinsparungen und Produktivitätserhöhungen erwarten. Dazu bietet die Bauelementeindustrie der DDR ein vielfältiges Sortiment mikroelektronischer Bauelemente an. Unser Titelbild zeigt Mikroelektronik in Hybridtechnik aus dem Kombinat VEB Keramische Werke Hermsdorf.

Foto: Werkfoto

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN

Träger des Ordens Banner der Arbeit

Aus dem Inhalt

Seite

Aktuelle Information 202

Krampitz, R.
Elektrotechnologie — qualitativer Faktor für den Fortschritt der Technologie 203

Fachaufsätze

Laurent, K.-H.; Kunert, M.; Schulze, H.-P.
Rechnergestützte Optimierung des elektroerosiven Senkprozesses (EDM) 205

Peitzsch, L.; Truong quang Mui
Elektroerosives Trennen schwer spanbarer metallischer Werkstoffe mit rotierender Scheibenelektrode 209

Nestler, K.; Wicht, H.
Toxische Abprodukte und umweltgerechte Gestaltung des elektrochemischen Metallabtrages 211

Richter, W.; Hänel, U.
Feste elektrische Verbindungen mit AlCu-Leitern bei Schwingbelastung 215

Teßmer, R.; Springer, S.
Digitale Simulation von Prozeßgrößen der Elektroantriebstechnik auf dem Mikrorechnerentwicklungssystem MRES 20 218

Ermisch, J.
Betrachtungen zum Einsatz neuartiger Wandler 219

Metzner, H.; Roseburg, D.
Die Ummagnetisierungsverluste geometrisch verkleinerter Modellanordnungen 222

Gruhn, G.
Zur Anpassung von Schutzstromwandlern an den unabhängigen elektronischen Überstromzeitschutz 224

Bunzel, E.; Hauptmann, M.; Kunckel, K.-H.; Paulig, E.; Schubert, P.
Ausgewählte Probleme bei Messungen an elektrischen Maschinen 227

Umschau

Persönliches 231

Fachtagungen 231

Zeitschriften 236

Bücher 237

AKTUELLE INFORMATION

Technische Kybernetik

15. Herbstkurse

Zeit: 22. bis 26. Oktober 1984
Ort: Magdeburg
Veranstalter: Kooperationsgemeinschaft „Technische Kybernetik"
Ziel: Weiterbildung von Hoch- und Fachschulkadern

Thematik

Es sind vier Sektionen mit folgendem Inhalt vorgesehen

— Entwurf von Basiregelungen für multivariable (Groß-)Systeme
Referent
Prof. Dr. sc. techn. *Korn*,
TH Magdeburg

— Ausgewählte Methoden der Echtzeitidentifikation
Referenten
Doz. Dr. sc. techn. *Döschner*, TH Magdeburg
Doz. Dr. sc. techn. *Buchta*, TU Dresden

— Verhaltensbeschreibung und Dimensionierung von Mikrorechner-Automatisierungsanlagen
Referent
Prof. Dr. sc. techn. *P. Neumann*,
TH Magdeburg

— Ablauf und Probleme der Einsatzvorbereitung von Mikrorechner-Automatisierungsanlagen, dargestellt an zwei realisierten Importanlagen
Referenten
Dr.-Ing. *G. Müller*, TH Magdeburg
Dr.-Ing. *H. Franke*, GRW Teltow
Doz. Dr.-Ing. *G. Reinig*, TU Dresden

Anforderung der Einladung mit den Formularen für die Teilnahmemeldung und die Quartierbestellung sind zu richten an:

Technische Hochschule Otto von Guericke Magdeburg, Sektion Technische Kybernetik und Elektrotechnik

„15. Herbstkurse"
Dr.-Ing. *H. Bode*,
Tel. 592269
DDR — 3010 Magdeburg
PSF 124
H. Bode, Magdeburg EA 1758

Erhöhung der Zuverlässigkeit industrieller Erzeugnisse durch Nutzung der Mikroelektronik

7. Zuverlässigkeitstagung mit internationaler Beteiligung aus den RGW-Ländern

Zeit: Mai 1985
Ort: Leipzig
Veranstalter: Fachverband Elektrotechnik in der Kammer der Technik, Wissenschaftliche Sektion Qualitätssicherung und Zuverlässigkeit

Inhaltliche Schwerpunkte

1. Theoretische Grundfragen der Zuverlässigkeitstechnik
   - Probleme bei der Zuverlässigkeitsbewertung und Zuverlässigkeitsoptimierung
   - Möglichkeiten und Grenzen der Zuverlässigkeitsvorhersage u.a.m.
2. Experimentelle Ermittlung von Zuverlässigkeitsaussagen und Ausfallursachen
   - Schätzen und Testen von Zuverlässigkeitsparametern
   - Abhängigkeit der Zuverlässigkeit von der Belastung
   - Fehlerdiagnose
   u.a.m.
3. Fertigungsprozeß und Erzeugniszuverlässigkeit
   - Einfluß der Technologie auf die Zuverlässigkeit von Bauelementen und elektrischen Verbindungen
   - Einfluß von Lagerung und Transport auf die Zuverlässigkeit
   u.a.m.
4. Zuverlässigkeit unter Umgebungsbeanspruchungen
   - Konstruktive und prüftechnische Zuverlässigkeitssicherung bei mechanisch und klimatisch beanspruchten Erzeugnissen
   - Degradations- und Störmechanismes für umweltbeanspruchte Bauteile und Geräte
   u.a.m.

Vortragsmeldungen mit Angabe des Themas und maximal 10 Zeilen zum Vortragsinhalt sind umgehend an den Fachverband Elektrotechnik zu richten.

Schriftliche Anfragen und Teilnahmemeldungen

Kammer der Technik — Präsidium — Fachverband Elektrotechnik
DDR — 1086 Berlin
Clara-Zetkin-Str. 115/117
G. Klotz, Berlin EA 1740

Klimaeinflüsse auf elektrische Energieanlagen

7. KDT-Fachkolloquium Elektroenergieversorgung

Zeit: 21. und 22. November 1984
Ort: Zittau, HOG „Burgteich"
Veranstalter: KDT-FA Isolationsfragen, FUA 1.12 Starkstromfreileitungen und KDT-FS-E der Ingenieurhochschule Zittau
Ziel: Repräsentative Darstellung des erreichten Standes in Übersichts- und Problemvorträgen durch führende Fachleute der DDR

Themen

— Eisablagerungen auf elektrotechnischen Betriebsmitteln
— Leiterbewegungen bei HS-Freileitungen durch Einwirkungen von Eis und Wind
— Fremdschichtmessungen an Isolatoren
— Auswahl und Bemessung von Isolatoren mit Fremdschichten

Anfragen

IH Zittau
KDT-Fachsektion E
DDR-8800 Zittau
Postfach 261
Tel. 61314/61315
R. Reinhold, Zittau EA 1720

Internationale Meßtechnische Konföderation Technisches Komitee 12 Temperaturmeßtechnik

2. Symposium zur Temperaturmessung in Industrie und Wissenschaft

Zeit: 16. bis 18. Oktober 1984
Ort: Suhl

Im Ergebnis von zwei erfolgreichen Symposien zur Temperaturmessung in Prag 1975 und 1978 wurde anläßlich des VII. IMEKO-Kongresses in Moskau 1979 das Technische Komitee Temperaturmeßtechnik (TC 12) der IMEKO gegründet.
Im Oktober 1981 veranstaltete das TC 12 in Karlovy Vary, ČSSR, sein 1. Symposium, das Fachleute aus 13 Ländern zu einem sehr erfolgreichen Informations- und Erfahrungsaustausch zusammenführte.
Im Mai 1983 organisierte das TC 12 einen Workshop zur Messung der Wärmeleitfähigkeit in Budapest, Ungarische VR.
In Fortsetzung dieser Veranstaltungen organisiert das TC 12 in Zusammenarbeit mit der Wissenschaftlich-technischen Gesellschaft für Meß- und Automatisierungstechnik (WGMA) in der Kammer der Technik das 2. Symposium Temperaturmessung in Industrie und Wissenschaft in der Deutschen Demokratischen Republik. Es findet vom 16. bis 18. Oktober 1984 in Suhl statt. Wissenschaftler und technische Experten aus 16 Ländern haben dafür 60 Vorträge angemeldet. Diese behandeln neue wissenschaftliche Erkenntnisse und Anwendungserfahrungen zu folgenden thematischen Schwerpunkten

— Weiterentwicklung der Internationalen Praktischen Temperaturskala
— Temperatursensoren und ihre Kalibration
— Statisches und dynamisches Verhalten von Temperatursensoren
— Einsatz von Mikrocomputern in der Temperaturmeßtechnik
— Strahlungs-Temperaturmessung
— Industrielle Temperaturmessung
— Messung von thermophysikalischen Eigenschaften, Dilatometrie und Wärmestrommessungen.

Publikationen

Nach der Anmeldung zum Symposium erhalten die Teilnehmer die Kurzfassungen der zum Symposium angenommenen Vorträge. Ein Tagungsband mit den vollständigen Vortragstexten (Preprints) wird den Teilnehmern bei der Registration übergeben.

Konferenzsprache

Die Arbeitssprache des Symposiums ist Englisch. Eine Simultanübersetzung Englisch-Deutsch ist vorgesehen.

Teilnehmergebühren

Für Teilnehmer aus sozialistischen Ländern beträgt die Teilnehmergebühr 400,— M einschließlich der Kurzfassungen und der Preprints.

Programm und Anmeldung

Das Programm des Symposiums wird zusammen mit dem Anmeldeformular ab Januar 1984 versandt. Die verbindliche Anmeldung muß bis spätestens 30. Juli 1984 erfolgen.

Anfragen

Doz. Dr.-Ing. *F. Bernhard*
Technische Hochschule Ilmenau
DDR — 6300 Ilmenau, Am Ehrenberg
F. Bernhard, Ilmenau EA 1664

Elektrotechnologie – qualitativer Faktor für den Fortschritt der Technologie

Von

Prof. Dr.-Ing. Reinhold Krampitz

Leiter des Lehrstuhls Elektrotechnologie an der Sektion Technische Kybernetik und Elektrotechnik der Technischen Hochschule Otto von Guericke Magdeburg

Mitglied des Internationalen Komitees für Elektrobearbeitung

Zu den bekannten Vorteilen der Energieform Elektrizität, wie günstiger Energietransport und bequeme technologische Handhabbarkeit, hat die Entwicklung der Leistungselektronik einen weiteren Vorzug der Elektroenergie hervorgebracht. Dieser besteht in der heute mit den Mitteln der Leistungselektronik nach Spannungsform, Stromniveau, Frequenz oder nach geforderter Impulsform nahezu unbegrenzt möglichen Anpassung der Elektrizität an einen technologischen nutzbaren physikalischen oder chemischen Effekt.

Mit der jetzt erreichten Variationsbreite der Energieform Elektrizität wird der Technologie die Vielfalt der aus Physik und Chemie bekannten Effekte erschlossen [1].

Als Anfang der 50er Jahre der Transistor und der Thyristor verfügbar wurden, sind weltweit intensive und erfolgreiche Entwicklungen eingeleitet worden. Durch die Ausnutzung lange bekannter oder gerade erst entdeckter naturwissenschaftlicher Effekte konnte man nun zu neuartigen technologischen Verfahren gelangen und mit entsprechend neuen technischen Ausrüstungen auch auf dem Maschinenmarkt wirksam werden.

Viele dieser technologischen Entwicklungen stellen die direkte technische Basis für die vom X. Parteitag der Sozialistischen Einheitspartei Deutschlands beschlossenen ökonomischen Strategie der DDR-Industrie dar.

Die folgende Übersicht zeigt eine Auswahl neuerer elektrotechnologischer Produktionsverfahren.

Technologien zur Rohstoffveredelung

- Ausdehnung der Induktionserwärmung auf das Vergüten von Kristallmaterial und Gläsern
- Elektronenstrahlschmelzen von Qualitätsstählen
- Gewinnung einheimischer Werkstoffe bei hohen Reinheitsgraden in elektrischen oder magnetischen Hochgradient-Feldern
- Funktionsanpassung billiger Vormaterialien (wie Werkstücke, Halbzeugmaterialien, Plastfolien) durch Erzeugung funktioneller Oberflächenschichten
  - galvanisch
  - elektrophoretisch
  - in Bedampfungs-, Spritzbeschichtungs- oder Oberflächenumwandlungsverfahren mit Elektronenstrahlen
  - Konditionierung von Metall- und Plasteoberflächen im elektrischen Glimmfeld
- Vergütung von Plastwerkstoffen durch Molekülvernetzung oder durch Polymerisierungseffekte mit Elektronenstrahlen.

Technologische Verfahren zur Intensivierung der Produktion

- Funkenerosive Trennbearbeitung mittels Drahtelektrode bei Realisierung genauer Formschnitte (Genauigkeit: 10 µm-Bereich) in Stahl- oder Hartmetallmaterial bis zu 120 mm Stärke [2]
- Elektrokontaktbearbeitung mit rotierender Stahlblechscheibe oder einem umlaufenden Stahlband als Werkzeug; für das rasche Trennen von Metallteilen oder für die Bearbeitung von stromleitfähigen Stoffen, die sonst einen großen Aufwand an Werkzeugen und Bearbeitungszeit erfordern (siehe Bilder 1 und 2)
- Laser-Trennschneiden für metallische und nichtmetallische Stoffe bei rationellem Einsatz auch in der Klein- und Mittelserienfertigung [3]
- Elektronenstrahllithografische Mikrostrukturierung von Substraten und Masken durch programmierte Strahlführung bei hoher Gravurgeschwindigkeit (etwa 2 m s^{-1}) [4]
- Hochfrequenz-Längsnahtschweißen von Rohren und Längsprofilen mit $f = 200$ kHz bis 1 MHz bei Schweißgeschwindigkeiten bis 100 m min^{-1}
- Elektroimpulstechnologien auf der Grundlage der Ausnutzung von Druckwelleneffekten durch die Wirkung nichtstationärer Magnetfelder für Fügeoperationen, z. B. in der Konsumgüterproduktion, oder durch die Anwendung von elektrischen Unterwasserentladungen in technologischen Robotern der Gießereiindustrie [1] [5].

Bei korrekter Anpassung der entsprechenden Verfahrenstechnik an die technologische Aufgabenstellung werden in einzelnen Verfahrenskategorien Produktivitätserhöhungen in Größenordnungen bis zum 10fachen gegenüber den herkömlichen Technologien bei prinzipieller Verbesserung der Arbeitsbedingungen erreicht. Die Einführung elektrotechnologischer Produktionsverfahren geht gewöhnlich mit der Einsparung von Prozeßstufen, mindestens aber mit einer optimierten Prozeßführung, einher. Erste energetische Grundsatzuntersuchungen haben z. B. für das scheinbar energieaufwendige Verfahren der elektrochemischen Metallbearbeitung eine Senkung des Elektroenergieaufwands auf etwa 40% nachnachgewiesen [6].

Wenn auch ein CO_2-Laser einen Wirkungsgrad von weniger als 10% besitzt, ist es doch möglich, unter Ausnutzung der Fokussierung und der technologisch angepaßten Strahlpulsung bereits mit relativ kleinen bis mittleren Strahlleistungen von 400 bis 500 W Aufgaben des materialsparenden Blechzuschnitts oder der Feinschweißtechnik rationell zu lösen. Nach dem heutigen Erfahrungsstand läßt sich die technologische Leistungsfähigkeit eines CO_2-Laserstrahls nach folgenden Beziehungen abschätzen [3]:

Stahlblechschneiden

$$\hat{d} \approx 10\, P_L$$

$$v_T \approx \frac{q_T}{d} P_L;$$

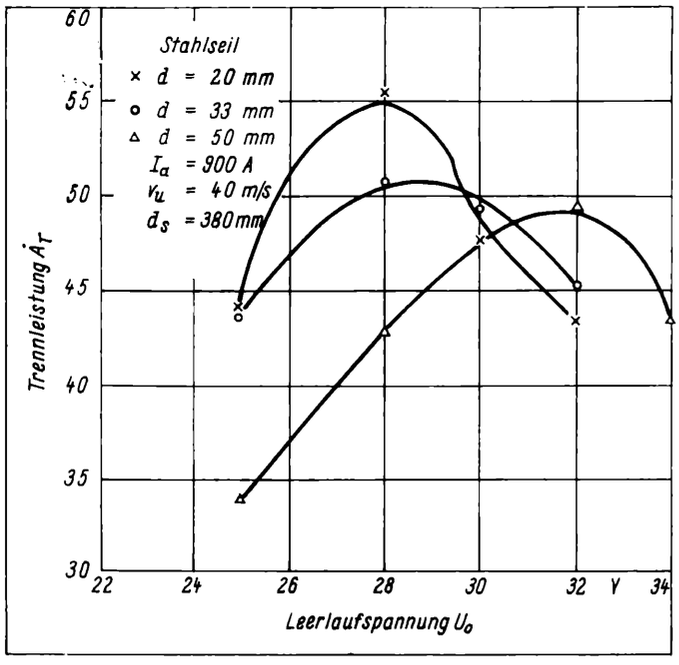
wobei für Stahl gilt:

d	$d \approx \hat{d}$	$d < \hat{d}$
q_T	≈ 8	≈ 12

Laserschweißen von Stahl

$$\hat{h} \approx 1{,}5\, P_L$$

$$v_S \approx \frac{q_S}{d} P_L;$$



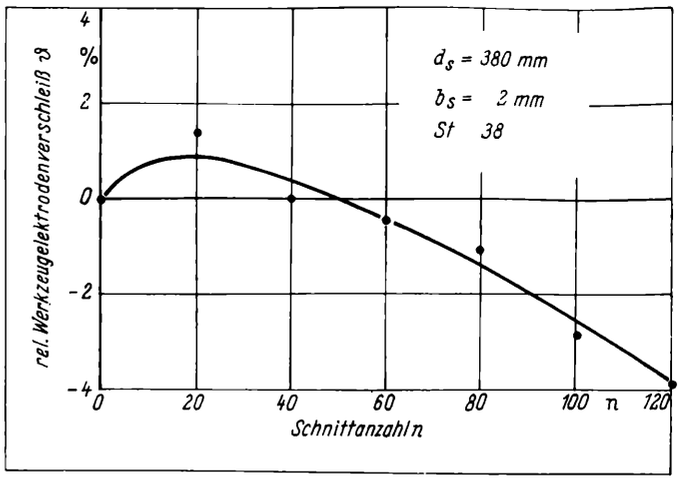


Bild 2. Relativer Werkzeugelektrodenverschleiß bei der Durchführung von Trennschnitten gemäß Bild 1

Bild 1. Trennen von Stahlseilen mit dem Verfahren der Elektrokontaktbearbeitung (Ordinatenwerte in mm^2/s)
d Seildurchmesser, I_a mittlerer Arbeitsstrom, v_u Umfangsgeschwindigkeit der Trennscheibe

wobei für Stahl gilt: $q_S = 2$

d Blechdicke in mm
P_L Laserstrahlleistung in kW
v_T Trenngeschwindigkeit in m min^{-1}
h Schweißtiefe in mm
v_S Schweißgeschwindigkeit m min^{-1}
q_T, q_S werkstoffcharakteristische Faktoren.

Für eine kundenwunschabhängige Sonderfertigung eines Armaturenbretts für ein Spezial-Nutzfahrzeug wurden kalkuliert:

a) bei manueller Fertigung:	16 h
b) bei Laserzuschnitt:	
• Schnittprogrammierung	2 h
• Laserschnittzeit	0,17 h
	2,17 h.

Die Bilder 1 und 2 geben für die Elektrokontaktbearbeitung am Beispiel des Trennens von Stahlseilen mit Hilfe einer rotierenden Stahlscheibe (Durchmesser d_S = 380 mm; Scheibenbreite b_S = 2 mm; St 38; Hochstromtransformatorenausgang mit Trenngut und Trennscheibe kontaktiert) eine Übersicht über technische Verfahrensparameter und die erreichbare technologische Leistungsfähigkeit.
In Abhängigkeit vom Seildurchmesser sind folgende Trennzeiten $t_{T\,min}$ erreichbar

d in mm	20	33	50
$t_{T\,min}$ in s	3,0	10,6	24,5

Bild 2 vermittelt einen Eindruck von der hohen Standmenge der billigen Stahlscheibe als Trennwerkzeug. Nach 120 Schnitten hat die Stahl-Trennscheibe durch die Lichtbogenwirkungen in der Kontaktzone zum Werkstück lediglich einen Masseverlust von 4% erlitten.

Am Beispiel der Entwicklung von Schweißumrichtern zeigt Tafel 1, welche Einsparung an Material und Senkung von Energieverlusten durch den Einsatz von elektronischen Stromquellen erreicht werden [7].
Derartige Umrichter lassen sich überall dort einsetzen, wo technologische Prozesse vom Energieangebot des elektrischen Netzes ausgehend eine verfahrensnotwendige Anpassung der Darstellungsform der Elektroenergie erfordern. Durch die Wandlung der Energieform-Parameter auf Mittelfrequenzniveau ergeben sich die dargestellten Senkungen des Leistungsmasse vor allem aus der Reduzierung der Transformatormasse mit entsprechenden Effekten der Walzstahleinsparung, wohingegen die erforderliche geräteinterne Leistungselektronik mit geringerem Materialaufwand realisiert wird.
Die Entwicklung der verfahrenstechnischen Leistungselektronik für elektrotechnologische Produktionsverfahren ist heute dadurch charakterisiert, daß sich die maschinenmäßige Gestaltung derartiger Produktionssysteme in der vollständigen Integration von Leistungs- und Mikroelektronik — und diese zusammen mit dem Maschinenbau vollzieht. Mikrorechner werden hierbei sowohl für die prozeßinterne Steuerung der Prozeßabläufe als auch mit größter Konsequenz für den rationellen Bedienkomfort der automatisch arbeitenden Produktionssysteme eingesetzt. In der technologischen Funktion bilden diese beiden Strukturbereiche eine direkte Einheit, die in ihrer Hardware- und Softwaregestaltung in starkem Maße durch die jeweilige Prozeßspezifik als einheitliche „Maschinenelektronik" geprägt ist. Die kommenden Fortschritte werden durch die demnächst zu erwartende Verfügbarkeit von Kundenschaltkreisen und Ein-Chip-Rechnern mit ihren vielfältigen Einsatzmöglichkeiten beim Maschinenhersteller bestimmt werden.

Tafel 1. Vergleich von Schweißgleichrichtern und Schweißumrichtern (bei 60% ED)

	Schweißgleichrichter RGa 250.3	G 400	Schweißumrichter[1]) 250 A	400 A
Masse in kg	180	245	35	50
η	0,78	0,75	0,85	0,85
cos φ	0,60	0,62	0,99	0,99
Zeitkonstante in ms	100	100	0,1	0,1

1) Funktionsmuster der TH Magdeburg

Literatur

[1] Conrad, H.; Krampitz, R.: Elektrotechnologie. Berlin: VEB Verlag Technik 1983
[2] Zacharias, P: Theorie der Prozeßbedingungen in ihrem Einfluß auf Produktivität und Bearbeitungsgenauigkeit beim funkenerosiven Trennen. Magdeburg, Diss. TH Otto von Guericke 1981
[3] Böhme, D.: Perforation, Welding and Surface Treatment with Electron and Laser Beam. Electromachining-Proceedings of the 7th International Symposium, Birmingham, 1984, S. 189—199
[4] Schiller, S.; Heisig, U.; Panzer, S.: Elektronenstrahltechnologie. Berlin: VEB Verlag Technik 1976
[5] Scheibe, P.: Anwendungsorientierte Untersuchungen zum elektrohydraulischen Effekt. Magdeburg, Diss. TH Otto von Guericke 1980
[6] Krampitz, R.; Bruckmann, G.: Rationalization through Microcomputer-Controlled Electrochemical Machining in Parts Production. Electromachining-Proceedings of the 7th International Symposium, Birmingham, 1984, S. 433—442
[7] Mecke, H.; u.a.: Stand und Perspektiven elektronischer Stromquellen für das Lichtbogenschweißen. Kolloquium Grundlagen der Schweißtechnik. ZIS Halle, 4/84

EA 1738

Rechnergestützte Optimierung des elektroerosiven Senkprozesses (EDM)

K.-H. Laurent, KDT; M. Kunert, KDT; H.-P. Schulze, KDT; Magdeburg

1. Aufgabenstellung beim Mikrorechnereinsatz für die Elektroerosion

Die rapide steigende Anzahl von Bearbeitungsfällen von elektrisch leitenden Materialien mit extremen mechanischen Eigenschaften verlangt, daß die nichtkonventionellen elektrotechnologischen Fertigungsverfahren noch optimaler genutzt werden als bisher. Die elektroerosiven Verfahren zeichnen sich dabei aus durch eine sehr hohe Bearbeitungsgenauigkeit [1] [2], durch das Herstellen komplizierter Raumformen in einem Arbeitsgang [3] [4], durch die gezielte Beeinflussung der Bearbeitungsoberfläche [5] [6] und durch den hohen Grad der Automatisierung [7]. Die meisten Anlagen werden aber nach unzureichenden Grobtechnologien und der Erfahrung des Bedieners betrieben, wodurch die Bearbeitungen in vielen Fällen nicht optimal sind. Diese Reserven können dann ausgeschöpft werden, wenn die notwendigen Optimierungsaufgaben durch ein Mikrorechnersystem (MRS) übernommen werden:

- Off-line-Optimierung wird über Großrechner (EC 1040) vorbereitet und für das MRS K 1520 modifiziert
- On-line-Optimierung wird mittels MRS K 1520 zur Prozeßführung und zur Prozeßregelung durchgeführt.

Aus den entwickelten Theorien [1] [8] werden primäre und sekundäre Bearbeitungsparameter bestimmt, die für die einzelnen Optimierungsstrategien benötigt werden. Die Off-line-Optimierung wird dabei auf zwei bis drei unabhängige primäre Parameter beschränkt, während bei der On-line-Optimierung eine größere Anzahl von Parametern berücksichtigt werden muß.

2. Off-line-Optimierung ausgewählter Prozeßparameter mit Mikrorechner

Bei den meisten im Einsatz befindlichen ED-Senkanlagen wird die Voreinstellung der primären Impulsparameter nach vorhandenen Teiltechnologien und der Erfahrung des Anlagenbedieners vorgenommen. Beide Einflußfaktoren weisen folgende erhebliche Mängel auf:

- Nicht für alle Bearbeitungsfälle sind ausreichend gesicherte Kennwerte und Technologien vorhanden
- Fehleinschätzung des Prozeßzustandes und zu spätes bzw. falsches Reagieren durch den Bediener führen zu Unsicherheiten.

Erste Voraussetzung für eine optimale Bearbeitung ist es, die günstigsten Startbedingungen zu ermitteln. Für die elektroerosive Bearbeitung sind dabei von Bedeutung: der stochastische Charakter und die nicht vollständig geschlossene Theorie des Prozesses, wodurch einige Abhängigkeiten angenähert werden müssen. Durch die Anwendung von Großrechenanlagen können die experimentellen Daten verdichtet werden, so daß mittels MRS K 1520 die Startbedingungen mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden können. Zur Minimierung der technologischen Voruntersuchungen sind Algorithmen zu erarbeiten. Die ausgewählten primären Prozeßparameter für die Off-line-Optimierung sind:

a) die Bearbeitungsparameter mittlerer Impulsstrom i, die Impulsdauer t_i und das Tastverhältnis τ;
b) die technologischen Parameter Abtragsrate V_W, der Verschleiß ϑ und die mittlere Rauhtiefe R_a.

Die mathematischen Abhängigkeiten für den zweidimensionalen Fall sind in den Gleichungen (1) bis (3) angegeben.

$$V_W = f_1(i, t_i) = a_0 + \sum_{\mu=1}^{n} a_\mu t_i^{\mu} + \sum_{\eta=n+1}^{m} a_\eta i^{\eta} \tag{1}$$

$$\vartheta = f_2(i, t_i) = b_0 + \sum_{\mu=1}^{n} b_\mu t_i^{\mu} + \sum_{\eta=n}^{m} b_\eta i^{\eta} \tag{2}$$

$$R_a = f_3(i, t_i) = c_0 + \sum_{\mu=1}^{n} c_\mu t_i^{\mu} + \sum_{\eta=n}^{m} c_\eta i^{\eta} \tag{3}$$

Bei einem günstig gewählten Ansatz zur Bestimmung der Konstanten a_v, b_v und c_v führt die Methode der „kleinsten Fehlerquadrate" auf inhomogene lineare Gleichungssysteme mit konstante Koeffizienten:

$$\begin{bmatrix} V_{W1} \\ V_{W2} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ V_{Wn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n\,\Sigma t_i\,\Sigma t_i^2 \cdots \Sigma i\,\Sigma i^2 \cdots \\ \Sigma t_i\,\Sigma t_i^2\,\Sigma t_i^3 \cdots \Sigma i^2\,\Sigma i^3 \cdots \\ \cdot \quad\quad \cdot \\ \cdot \quad\quad \cdot \\ \cdot \quad\quad \cdot \\ \cdot \quad\quad \cdot \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ a_m \end{bmatrix} \tag{4}$$

$$V_W = A\,a \qquad a = A^{-1}\,V_W$$

Analog gilt dies auch für die Bestimmung der Konstanten b_i und c_i. Diese Berechnung kann ohne großen Aufwand mit der Rechenanlage EC 1040 erfolgen. Im Bild 1 ist die ermittelte Abhängigkeit $V_W = f(i, t_i)$ als Höhenparameter dargestellt. Die erhaltenen Koeffizienten dienen als Ausgangspunkt für die Off-line-Optimierung des ED-Senkprozesses mit dem MRS K 1520.

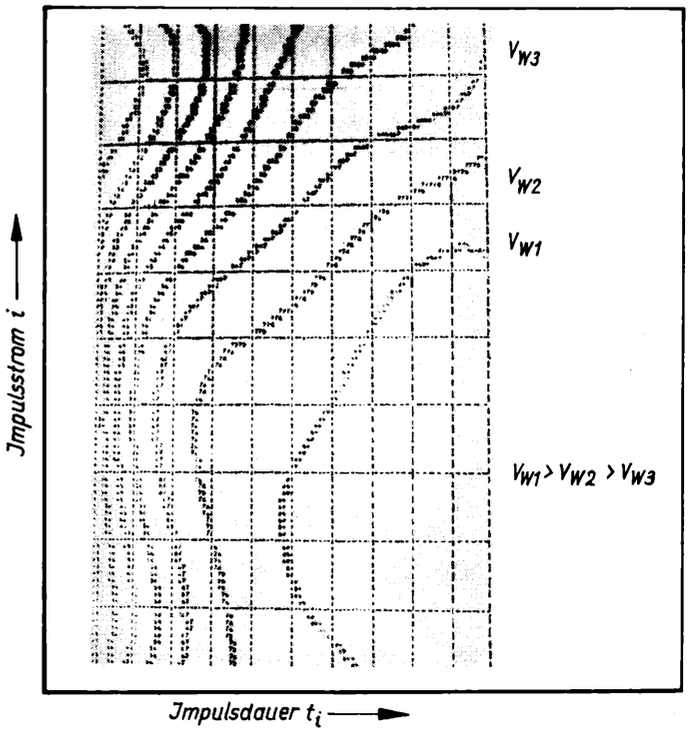
2.1. Auswahl des Optimierungsverfahrens

Für die Off-line-Optimierung wird ein Verfahren verlangt, in dem die lokalen Extremwerte der technologischen Zielparameter nicht das Endergebnis verfälschen. Mit dieser Sicherheit sollte eine geringere Rechenzeit und ein minimaler Speicherplatzbedarf gefordert werden. Zu diesem Zwecke sind folgende Optimierungsverfahren analysiert worden:

- Gauß-Seidel-Verfahren
- Gradienten-Verfahren
- Box-Wilson-Verfahren
- Matrix-Suchverfahren.

Für den vorgegebenen mathematischen Ansatz der Gl. (1) bis (3) wurde das Matrix-Suchverfahren ausgewählt, da bei beliebigen Startpunkt die lokalen Extrema die berechneten optimalen Parameter nicht verfälschen. Der Rechenaufwand steigt mit abnehmender Schrittweite. Dies macht das Verfahren nur anwendbar, wenn genügend Rechenzeit zur Verfügung steht. Das Matrix-Suchverfahren läßt sich auch erfolgreich in Kombination mit einem anderen oben genannten Verfahren anwenden. Hierbei wird zunächst mit einer vergleichsweise hohen Schrittweite das gesamte interessierende Gebiet mit dem Matrix-Suchverfahren abgesucht.

Bild 1. Höhenlinien der Funktion $V_W = f_1(i, t_i)$ berechnet mit der Rechenanlage EC 1040



Dipl.-Ing. *Karl-Heinz Laurent* ist wissenschaftlicher Assistent, Dipl.-Ing *Martin Kunert* ist Forschungsstudent und Dr.-Ing. *Hans-Peter Schulze* ist wissenschaftlicher Assistent an der Technischen Hochschule Otto von Guericke Magdeburg, Sektion Technische Kybernetik und Elektrotechnik, Wissenschaftsbereich Elektrotechnologische Verfahren und Anlagen.

Tafel 1. Gegenüberstellung ausgewählter Optimierungsverfahren

Kriterium	GAUSS-SEIDEL-VERFAHREN	GRADIENTEN-VERFAHREN	MATRIX-SUCH-VERFAHREN
Rechenzeit	mittelmäßig	gering	groß (schrittweitenabhängig)
Speicherplatzbedarf	gering	mittelmäßig	groß
wird das Optimum mit Sicherheit erreicht?	vom Startpunkt abhängig	vom Startpunkt abhängig	ja
Kombination mit anderen Verfahren	nach Matrixsuche anwendbar	nach Matrixsuche anwendbar	als Vorausberechnung für andere Verfahren

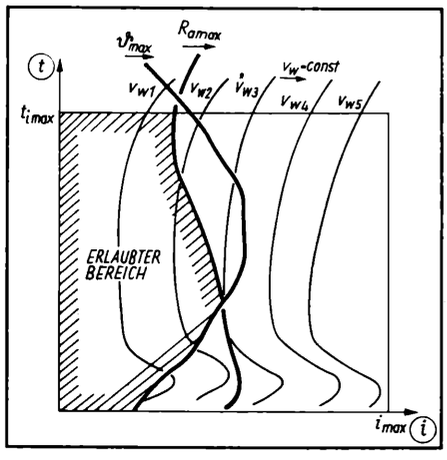


Bild 2
Darstellung der Optimierung mit Nebenbedingungen

Der erhaltene Wert wird als Startwert für das Box-Wilson-Verfahren verwendet. Tafel 1 zeigt eine kurze Gegenüberstellung der wichtigsten Verfahren im Überblick. Im allgemeinen müssen zusätzliche Restriktionen eingehalten werden. Beim ED-Senkprozeß sind beispielsweise folgende Nebenbedingungen zu berücksichtigen:

$$0 \leqq t_i \leqq t_{i\,max} \tag{5}$$

$$0 \leqq i \leqq i_{max} \tag{6}$$

$$\vartheta \leqq \vartheta_{max} \text{ und } R_a \leqq R_a \text{ max} \tag{7}$$

Diese Grenzbedingungen sind im Bild 2 dargestellt. Der maximale Wert der Abtragsrate V_W ist nun unter Berücksichtigung der Gleichungen (5) bis (7) zu berechnen.

2.2. Mikrorechnerspezifikation

Die Berechnung der optimalen Einstellwerte für t_i und i erfolgt auf einem MRS K 1520 durch Berechnung der Polynome (1) bis (3). Der Einfachheit halber wurde der Grad der Polynome auf 2 beschränkt.

Die berechneten Werte von i, t_i und V_W werden auf dem Monitor (Bild 3) dargestellt. Nach Erhalt des Optimums wird dies durch die Ausschrift „OPTIMALE WERTE" kenntlich gemacht, womit

Bild 3. Bildschirmanzeige der Restriktionen und der optimalen Bearbeitungsparameter

die Rechnung beendet ist und neue Optimalwerte unter anderen technologischen Bedingungen berechnet werden können.

Nach Ablauf der Off-line-Optimierung, der Berechnung der optimalen Einstellwerte für die bestimmenden Impulsparameter, kann die Bearbeitung gestartet werden. Von diesem Zeitpunkt an ist es notwendig, den Prozeß durch die Auswertung einer Vielzahl von indirekten Prozeßparametern auf dem voreingestellten Optimalzustand zu halten. Das MRS K 1520 wird zum Steuerrechner, der eine optimale Prozeßführung überwacht. Diese On-line-Optimierung hat u.a. folgende Teilaufgaben zu erfüllen:

- Vorschubregelung zur Einstellung einer optimalen Spaltweite
- Überwachung und Nachführung von Generator-Impulsparametern
- Spülmengenoptimierung

Ziel der Optimierung während der Bearbeitung ist z.B. eine Abtragsoptimierung und eine Verschleißminimierung durch die Off-line-Optimierung.

3. Zur Einordnung des Mikrorechners bei der On-line-Optimierung des elektroerosiven Senkens

Eine On-line-Optimierung der elektroerosiven Senkbearbeitung ist dadurch erschwert, daß die zu optimierenden technologischen Zielparameter während der Bearbeitung nicht direkt meßbar sind. Es ist notwendig, den Prozeß durch abgeleitete Impulsparameter bzw. Parameter des Elektrodenspaltraumes so zu identifizieren, daß eindeutige Rückschlüsse auf den Bearbeitungszustand getroffen werden können. Eine Optimierung des ED-Senkprozesses während der Bearbeitung ist außerdem durch die komplizierten, stochastisch beeinflußten Zusammenhänge zwischen den Prozeßparametern erschwert.

Der Mikrorechnereinsatz zur On-line-Optimierung bedingt eine hohe Flexibilität und die damit verbundene Anpaßbarkeit der Regelungsaufgabe an verschiedene Anwendungsfälle. Je nach Art und Anzahl der zu verarbeitenden Parameter sowie der Kompliziertheit der Regelaufgabe kann der Rechner als digitaler Regler für verschiedene Prozeßgrößen und/oder als Führungsgrößenrechner eingesetzt werden. Beide Einordnungsmöglichkeiten sowie ihre Kombination haben bereits vielfältige Anwendungen bei den verschiedensten technischen Aufgabenstellungen erfahren.

Der EDM-Prozeß stellt durch die stochastischen Parameterzusammenhänge sowie eine durch Art und Geschwindigkeit der Funkenentladungen bedingten hohen Prozeßdynamik besondere Anforderungen an den Mikrorechnereinsatz zur Prozeßregelung.

3.1. Der Mikrorechner als Regler

Im Bild 4 ist die Grundstruktur der Einordnung des Mikrorechnerreglers bei der EDM gezeigt. Der Rechner übernimmt die serielle Regelung (Abtast-Regelung) der vorgegebenen Prozeßparameter nach Prioritätenschemata und Algorithmen, die durch Software bestimmt werden. Die Anzahl der Meßgrößen $(i + j)$ ist größer als die Anzahl der Stellgrößen $(k + l)$.

Vorteile des direkten Einsatzes des Mikrorechners als Regler sind:

- Einfache Anpaßbarkeit an verschiedene Regelaufgaben durch Software
- Regelalgorithmen ausschließlich durch Software bestimmt
- Einsatz für komplizierte Lösungskonzepte (Mehrgrößenregelung) und nichtlineare Parameterabhängigkeiten möglich
- Reduzierung des Schaltungsaufwandes des Gesamtregelkreises
- Erhöhung der Zuverlässigkeit durch Verringerung der Anzahl der am Regelungsprozeß beteiligten Baugruppen.

Nachteile:

- Geringere Dynamik des Gesamtregelkreises durch serielle Abarbeitung der Teilregelungen
- Bei höheren Anforderungen an die Regeldynamik ist nur eine geringe Anzahl von Meß- und Stellgrößen verarbeitbar
- Teilregelstrecken mit großer Zeitkonstante blockieren den Rechner unverhältnismäßig lange
- Der Rechner ist durch Regelungsaufgaben (Meßwertübernahme, Vergleichsoperationen, Stellgrößenausgabe) ausgelastet, wodurch nur eine begrenzte Zeit zur Ausführung von Optimieroperationen zur Verfügung steht.

3.2. Der Mikrorechner als Führungsrechner

Die Nachteile des rein digitalen Reglers können durch das im Bild 5 dargestellte System beseitigt werden, indem die einzelnen zu regelnden Prozeßparameter über separate Teilregelkreise geführt werden. Der Rechner steuert die Sollwerte der einzelnen Teilregelkreise nach

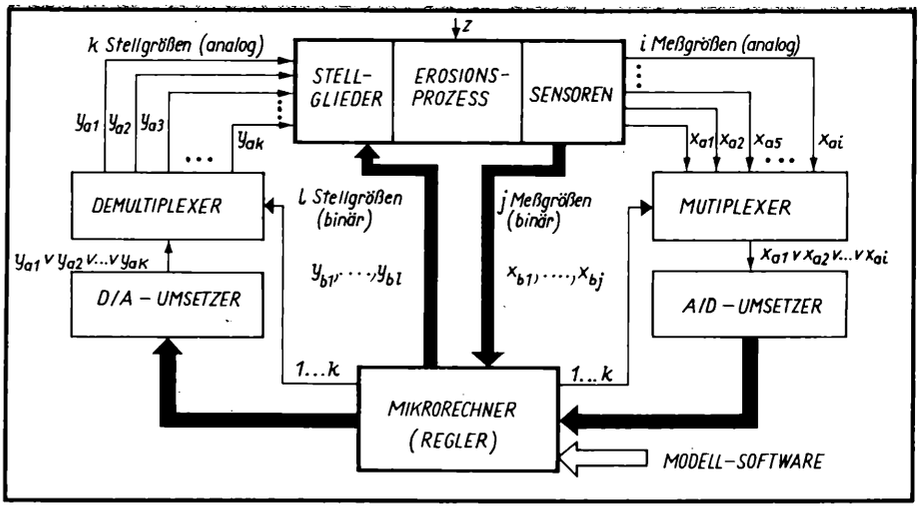


Bild 4. Digitaler Regelkreis (Grundstruktur) für ED-Prozeßführung

einer durch Software vorgebbaren Optimierstrategie. Über die binären Stellsignale $y_{b1} \cdots y_{bl}$ erhält der Rechner außerdem die Möglichkeit, im Havariefall und bei Prozeßstörungen direkt in den Prozeß einzugreifen. Im dargestellten System ist nahezu die gesamte Kapazität des MRS zur Realisierung von Optimieroperationen ausnutzbar.

Die einzelnen analogen Teilregelkreise sind in ihrer Dynamik an die jeweilige Regelgröße anzupassen. Da die Regelung außerhalb des Führungsrechners vorgenommen wird, blockieren auch Teilregelkreise mit langsamen Ausgleichsvorgängen den Rechner nicht für längere Zeiten.

Es lassen sich somit Regelstrukturen hoher Dynamik mit einer vergleichsweise hohen Anzahl verarbeitbarer Prozeßparameter aufbauen. Des weiteren besteht die Möglichkeit, den EDM-Prozeß ausschließlich durch die Verarbeitung indirekter Meßgrößen, z. B. Wirkverhältnis, Lichtbogenverhältnis, Funkenbrennspannung, d. h. ohne direkte Auswertung der Regelgrößen, durch den Rechner zu führen. Dies beinhaltet die Möglichkeit der Vereinfachung des Sensorsystems.

Die Vorteile der in den Abschnitten 3.1. und 3.2. beschriebenen Systeme lassen sich durch den Einsatz mehrerer Mikrorechner vereinen, wobei prozeßnahe Rechner (Vorortstationen) die digitale Regelung einer oder mehrerer Prozeßgrößen übernehmen und ein übergeordneter Steuerrechner die Verknüpfungsbeziehungen zwischen den digitalen Teilregelkreisen herstellt.

4. Zur Problematik der Meßwerterfassung bei der On-line-Optimierung des elektroerosiven Senkens

4.1. Anforderungen an die Sensortechnik

Unter Sensor soll in diesem Zusammenhang der prozeßnahe Meßfühler und die gegebenenfalls nachfolgende Signalverarbeitungsschaltung verstanden werden. Zielstellung bei der Konzeption von Sensoren zur Charakterisierung des elektroerosiven Senkprozesses ist die mit vertretbarem schaltungstechnischen Aufwand realisierbare weitestgehende Datenvorverdichtung außerhalb des Steuerrechners. Diese Notwendigkeit der Mikrorechner einerseits und der hohen dynamischen Anforderungen an ein On-line-Optimierregelsystem für EDM andererseits. Einzelne Entladungen müssen zwar erfaßt, aber die notwendige Prozeßinformation für den Mikrorechner aus einer Vielzahl von Erosionsentladungen abgeleitet werden.

Die Anforderungen, die an ein Sensorsystem zur Erfassung von Prozeßinformationen beim ED-Senken gestellt werden, sind im einzelnen:

- Prozeßdatenvorverdichtung zur Entlastung des Steuerrechners, wie z. B. Mittelwertbildung, Normierung auf eine Bezugsgröße, multiplikative Verknüpfungen
- Hohe dynamische Auflösungsfähigkeit der Sensoren bedingt durch hochfrequente Funkenüberschläge, die die Bedingungen im Arbeitsspalt in sehr kurzen Zeitabschnitten verändern, wobei Funkenbrennspannung, Zündverzug, Wirkverhältnis, Lichtbogenverhältnis, Spaltleitfähigkeit entscheidene Größen sind
- Berücksichtigung eines großen Parameterstellbereiches, bedingt durch die in der Praxis eingesetzten statischen Impulsgeneratoren hoher Leistungsbreite zur Realisierung unterschiedlicher Bearbeitungsaufgaben. Meßsysteme zur EDM-Prozeßdatenerfassung müssen entweder an die jeweiligen Bearbeitungsaufgabe anpaßbar sein bzw. über den ganzen Stellbereich der jeweiligen Parameter gültige Meßsignale liefern.
- Zuverlässigkeit und Störsicherheit, wobei folgende Anforderungen gestellt werden: unabhängig von der Bearbeitungsaufgabe mit hoher Sicherheit reproduzierbare Meßergebnisse, Un-

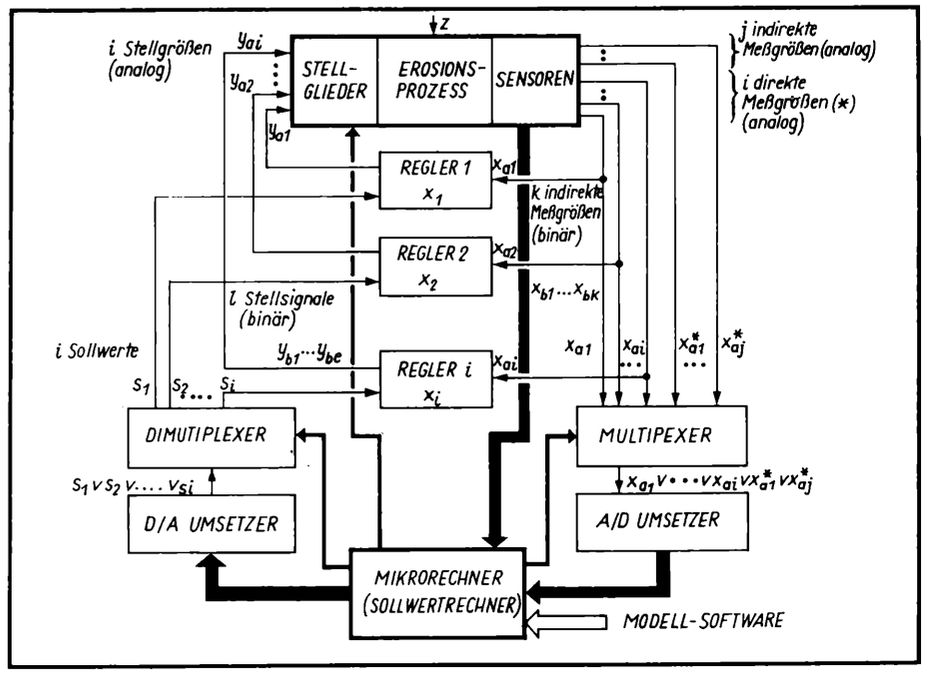


Bild 5. Einordnung des Führungsgrößenrechners bei der ED-Prozeßregelung (Grundstruktur)

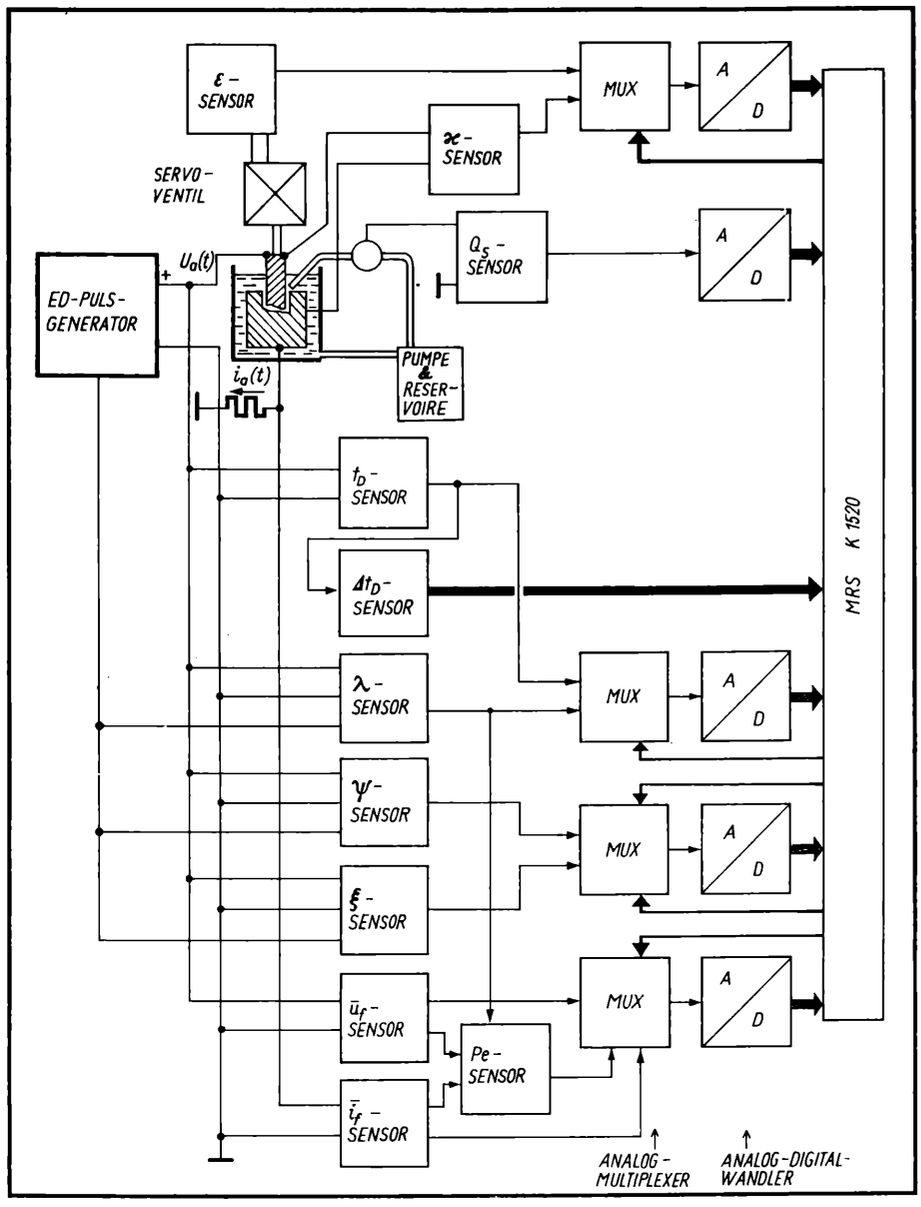
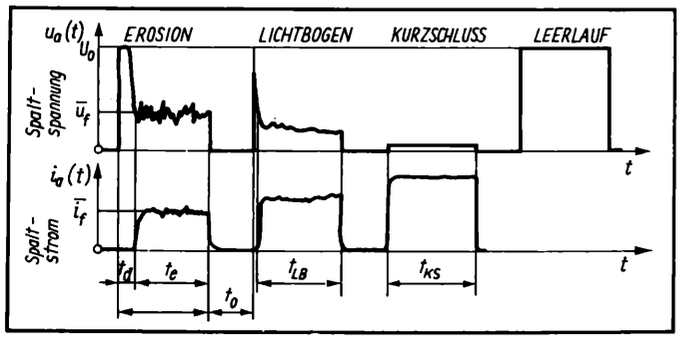


Bild 6. Meßwerterfassungssystem für ED-Senken

empfindlichkeit gegenüber dem bei ED-Anlagen erhöhten breitbandigen Störpegel und starken Temperaturschwankungen
— Die Genauigkeiten müssen der Meßaufgabe angepaßt sein.

Wenn eine analoge Meßwerterfassung erfolgt ist, muß das Meßergebnis zur Eingabe in den Mikrorechner digitalisiert werden. Die Nachschaltung je eines Analog-Digital-Umsetzers (ADU) nach jedem Sensor ist aus ökonomischen Gründen abzulehnen. Der andere Extremfall — ein Analog-Multiplexer (MUX) und ein ADU für alle analogen Meßsignale — würde einen großen Geschwindigkeitsverlust bei der Meßwerterfassung nach sich ziehen. Die jeweilige Schaltungsstruktur muß entsprechend der erforderlichen Meßgrößendynamik festgelegt werden. Höchste dynamische Anforderungen werden an die Umsetzung des Lichtbogenverhältnisses bzw. des Kurzschlußverhältnisses gestellt, da diese Prozeßgrößen zur Erfassung von Prozeßanomalien benötigt werden.

Bild 7. Zeitlicher Verlauf von Impulsspannung und -strom bei statischen Impulsgeneratoren



4.2. Sensorsystem zur Prozeßdatenerfassung beim ED-Senken

Im Bild 6 ist eine Variante für ein Prozeßdatenerfassungssystem für das ED-Senken im Überblick dargestellt. Im folgenden soll die verwendete Symbolik sowie Parameterdefinitionen kurz erläutert werden:

ε Vorschubstabilität

$$\varepsilon = 1 - \Delta v_v / v_{v\,\max} \tag{8}$$

v_v Vorschubgeschwindigkeit der Pinole
ϰ Spaltleitfähigkeit in der Pulspause
Q_S Dielektrikum-Spülmenge
t_D mittlere relative Zündverzugszeit

$$t_D = \bar{t}_d / t_i \text{ (Bild 7)} \tag{9}$$

Δt_D Schwankung der relativen Zündverzugszeit
λ Wirkverhältnis
t_e Erosionsentladungsdauer beim Einzelimpuls (Bild 7)

$$\lambda = \bar{t}_e / t_i \tag{10}$$

ψ Lichtbogenverhältnis
t_{LB} Dauer der Lichtbogenentladung beim Einzelimpuls

$$\psi = \bar{t}_{LB} / t_i \tag{11}$$

ξ Kurzschlußverhältnis
t_{KS} Dauer der Kurzschlüsse beim Einzelimpuls

$$\xi = \bar{t}_{KS} / t_i \tag{12}$$

$\bar{u}_f$ mittlere Funkenbrennspannung

$$\bar{u}_f = \frac{1}{t_e} \int_{t_{di}}^{t_i} u_f(t)\,\mathrm{d}t \tag{13}$$

$\bar{i}_f$ mittlerer Funkenstrom

$$\bar{i}_f = \frac{1}{t_e} \int_{t_{di}}^{t_i} i_f(t)\,\mathrm{d}t \tag{14}$$

P_e mittlere Entladeleistung

$$P_e = \frac{1}{t_i} \int_{t_d}^{t_i} i_f(t)\, u_f(t)\,\mathrm{d}t \tag{15}$$

$$\approx \bar{u}_f\, \bar{i}_f\, \frac{\bar{t}_e}{t_i} \tag{16}$$

Zur näheren Erläuterung einiger Impulsparameter soll Bild 7 dienen. Die im dargestellten System gewonnenen Meßgrößen können nach dem Entstehungsort ihrer Eingangsmeßgrößen klassifiziert werden. Während eine Gruppe von Sensoren Parameter des Elektrodenspaltraumes erfaßt, verarbeitet der größte Teil der Sensoren Impulsparameter der vom Generator gelieferten Spannungs- bzw. Stromimpulse.

Die technologischen Zielparameter des EDM-Senkprozesses — Abtragsrate, Verschleiß, Abbildungsgenauigkeit, Oberflächenrauhigkeit — können erst nach erfolgter Bearbeitung genau bestimmt werden. Aus indirekten (abgeleiteten) Meßgrößen, die mit Hilfe des dargestellten Sensorsystems ermittelt werden, können jedoch unter Zuhilfenahme umfangreicher technologischer und verfahrenstechnischer Grundlagenuntersuchungen eindeutige Aussagen über den Bearbeitungsverlauf während des Prozesses getroffen werden. So ist das Abtragsverhalten durch eine Verarbeitung der Meßgrößen Wirkverhältnis, Vorschubstabilität und Entladeleistung steuerbar. Eine Minimierung des Verschleißes und die Gewährleistung der gewünschten Oberflächengüte erfolgt z. B. durch Kontrolle und Regelung des relativen Zündverzuges, des Lichtbogen- und des Kurzschlußverhältnisses.

Die einzelnen Spaltspannung und -strom auswertenden Sensorschaltungen sind aus teilweise gleichartigen modularen Baugruppen zusammengesetzt — Fensterdiskriminator, Abtast-Halte-Schaltung, gesteuerter Tiefpaß zur Erzeugung von Impulszeitverhältnissen, Analogmultiplizierer —. Das Sensorsystem ist so konzipiert worden, daß es an verschiedene Bearbeitungsanlagen und Generatortypen anpaßbar ist.

5. Zusammenfassung

Grundvoraussetzung zur Automatisierung des EDM-Verfahrens ist die Realisierung rechnergestützter Off- und On-line-Optimierstrategien. Mit den vorliegenden Ergebnissen ist eine Möglichkeit gefunden, mittels des MRS K 1520 die Produktivität des Verfahrens wesentlich zu erhöhen. Bedingt durch die Anforderungen, die das elektroerosive Metallbearbeitungsverfahren an die Sensortechnik stellt, sind Baugruppen zur Datenvorverarbeitung in modularer Bauweise erstellt worden, die eine hohe Prozeßdynamik für Prozeßregelung und Prozeßsteuerung zulassen. Die Lösung mittels Mikrorechner ist anpaßbar an alle Anlagentechniken und Generatorvarianten, die die Stellbarkeit der ausgewählten Betriebsparameter gewährleisten.

Literatur

[1] *Zacharias, P.:* Theorie der Prozeßbedingungen in ihrem Einfluß auf die Produktivität und Bearbeitungsgenauigkeit beim funkenerosiven Trennen. Dissertation TH Magdeburg 1982

[2] *Livshic, A. L.:* Electric pulse and complex machining methods – efficiency criteria, technology trends and tooling. Proceedings of the ISEM 6, Krakow, 1980, S. 21–28

[3] *Undin, H.:* Elektroerosiv bearbetning – III. Verkstäderns, Juni 1973, S. 345 bis 349

[4] *Schulze, H.-P.; Schiedung, H.; Zacharias, P.; Bode, B.:* Forschungsbericht der TH Magdeburg, 1980

[5] *Krainer, E.:* Phasenumwandlungen in Metalloberflächen bei funkenerosiver oder anderer hochenergetischer Bearbeitung. Metallwissenschaften und Technik 25 (1971) 12, S. 1361–1364

[6] *Schulze, H.-P.:* Oberflächenstrukturausbildung bei der elektroerosiven Sinterhartmetallbearbeitung mit kleinen Impulsenergien. Dissertation TH Magdeburg 1982

[7] *Zolytych, B. N.; Chelichev, B. E.:* Osnovij teorii kompleksnoi avtomatisacii prozessov elektroerosionnoij obrabotka. Vortrag auf der 4. Fachtagung „Elektrotechnologie" 2.–3. 9. 82 in Magdeburg

[8] *Zolotych, B. N.:* Theorie zum Phänomen der funkenerosiven Bearbeitung. Fertigung (1971) 6, S. 185–192

[9] *Strobel, H.:* Experimentelle Systemanalyse. Akademie-Verlag Berlin 1975

EA 5365

Elektroerosives Trennen schwer spanbarer metallischer Werkstoffe mit rotierender Scheibenelektrode

L. Peitzsch; Truong quang Mui; Mittweida

1. Vorbemerkungen

Wolfram, Molybdän, Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoffe, Titan, Hartmetalle, Gußmagnetwerkstoffe, gehärtete, hochwarmfeste und säurebeständige Stähle gehören zu den schwer spanbaren metallischen Werkstoffen, die nur noch mit Schwierigkeiten getrennt werden können. Im allgemeinen befriedigen Schnittleistung, Schnittbreite und Schnittqualität bei den zum Ablängen im wesentlichen angewendeten Trennverfahren, wie Sägen, Fräsen oder Trennschleifen, nicht.

Durch ihren Einsatz im Werkzeugbau, im chemischen Behälter- und Apparatebau, in der Elektrotechnik, im medizinischen Gerätebau, im Werkzeugmaschinen- und Kraftfahrzeugbau steigt auch in unserer Industrie das Interesse an der wirtschaftlichen Bearbeitung der oben genannten Werkstoffe.

Eine Alternative zu den genannten und derzeit angewendeten Verfahren ist das elektroerosive Trennen mit Scheiben-, Band- und Drahtelektrode. Drahterosionsanlagen haben von den genannten Möglichkeiten die stärkste industrielle Anwendung erlangt und ihre Leistungsfähigkeit, vor allem im Werkzeugbau, bewiesen. Aus Japan ist bekannt, daß Elektroerosionsanlagen mit Bandelektrode industriell gefertigt werden und gute Leistungsparameter besitzen. Alle übrigen Varianten elektroerosiver und elektrochemischer Trennanlagen befinden sich offenbar noch im Versuchsstadium und haben in Europa noch keine industrielle Vorbreitung gefunden.

An der Ingenieurhochschule Mittweida existiert seit einigen Jahren eine elektrochemische Versuchstrennanlage mit rotierender Scheibenelektrode. Diese Anlage sollte unter weitgehendster Verwendung industriell gefertigter Baugruppen zu einer elektrochemischen und elektroerosiven Versuchstrennanlage erweitert werden. Außerdem ging es um die Ermittlung ihrer Leistungsfähigkeit und um praktische Erfahrungen beim erosiven Trennen mit rotierender Scheibenelektrode. Darüber wird im folgenden berichtet.

2. Zum Stand der Technik beim Trennen schwer spanbarer metallischer Werkstoffe

Zum Trennen schwer spanbarer Werkstoffe ist der Einsatz von Elektroerosionsbandsägen bekannt [1]. Die prinzipielle Leistungsfähigkeit dieser Hochgeschwindigkeits-Lichtbogenentladungsmaschinen ist beim Trennen der o. g. hochfesten Werkstoffe höher als beim Sägen, Fräsen und Trennschleifen, da Schnittleistung, Schnittbreite, Schnittqualität, Schnittbereich und Werkzeugkosten insgesamt günstigere Werte annehmen. Das wird noch deutlicher, wenn man gleichzeitig die im Verfahren begründeten generellen Vorteile wie berührungsloses Trennen und nahezu gleichbleibende Schnittbreite auch bei großen Werkstückquerschnitten beachtet.

Trennen durch Sägen, Fräsen, Trennschleifen oder Brennschneiden mit Plasmastrahl wird in der DDR industriell angewendet. Elektrochemische und elektroerosive Trennanlagen, ausgenommen sind Drahterosionsanlagen, haben noch keine industrielle Anwendung in der DDR gefunden, wenn man von einigen Versuchsanlagen absieht. Eine Ursache dafür dürfte auch darin zu suchen sein, daß solche Anlagen noch nicht verfügbar sind.

In den Arbeiten von *Brandt* und *Reitz* [2] [3] wird ausführlich über die Bearbeitung korrosionsbeständiger und hochwarmfester Stähle und Nichteisenmetalle informiert. Tafel 1 enthält durch Gespräche mit Technologen ermittelte Angaben zum Abtrennen von Wolfram- und Molybdänstäben durch Trennschleifen. Über das Abtrennen von Hartmetall sind keine Angaben bekannt, was darauf schließen läßt, daß es noch keine Anwendungen und praktischen Lösungen gibt.

Doz. Dr.-Ing. *Lothar Peitzsch* ist Hochschuldozent, Dipl.-Ing. *Truong quang Mui* ist Aspirant an der Ingenieurhochschule Mittweida, Sektion Informationselektronik.

Tafel 1. Ausgewählte Ergebnisse beim Trennschleifen von Wolfram- und Molybdänstäben

Durchmesser in mm	Schnittleistungen in cm²/min	Schnittbreite in mm	Standzeit der Trennscheibe (Anzahl der erreichbaren Schnitte)
4	2,3	0,5	300 – 400
8	1,5	0,5	50 – 70
10	0,8	0,5	10 – 20
12	0,6	2,5	etwa 10
16	0,4	2,5	etwa 2
20			

Tafel 2. Technische Daten der elektrisch-abtragenden Versuchstrennmaschine EAVTM 500 der IH Mittweida

Arbeitsspannung	
– Gleichspannung	0 bis 40 V, stufenlos einstellbar
– Pulsspannung	0 bis 30 V, stufenlos einstellbar
Dauerstrombelastung	max. 500 A
Drehzahl der Trennscheibe	0 bis 6000 min^{-1}, stufenlos einstellbar
Vorschubgeschwindigkeit	
– X-Richtung	0,01 bis 1 mm s^{-1}, stufenlos einstellbar
– Y-Richtung	0,1 bis 8 mm s^{-1}, stufenlos einstellbar
– Z-Richtung	0,01 bis 1 mm s^{-1}, stufenlos einstellbar
Angewendete Elektrolytflüssigkeiten	$NaNO_3$, NaCl usw.
Dielektrika	Leitungswasser, Trafoöl, ED 2
Werkzeugelektrode	
– Werkstoff	NIRO-, Tiefzieh-, Schwarz-, Al-Blech und Messing-Blech
– Dicke	0,5 bis 1,0 mm
– Durchmesser	200 bis 380 mm
Abmessungen der Arbeitswanne	1200 mm × 500 mm × 300 mm
Fassungsvermögen des	
– Elektrolytbehälters	200 l
– Dielektrikabehälters	500 l

3. Elektroerosive Trennanlage mit rotierender Scheibenelektrode

An der Ingenieurhochschule Mittweida wurde für Versuchszwecke die ECVTM 500 zum elektrochemischen Trennen hochfester Werkstoffe mit Hilfe einer rotierenden Scheibenelektrode entwickelt und aufgebaut. Sie besteht aus einer umgerüsteten Werkzeugschleifmaschine, einem zum elektrochemischen Senken entwickelten 1500 A/20 V-Gleichspannungsgenerator, einem ebenfalls zum Senken entwickelten 500 A/30-V-Pulsspannungsgenerator, einem Schweißgleichrichter 600 A/40 V und dem Elektrolytkreislauf. Um ein Verspritzen der Elektrolytflüssigkeit zu vermeiden, besaß diese Trennmaschine eine Arbeitskabine mit Absaugung. Diese Trennanlage wurde für das elektroerosive Trennen mit einem Dielektrikakreislauf, bestehend aus dem Dielektrikatank, der Förder- und Absaugpumpe, dem Filter und der Temperaturregelung erweitert. Die eigentliche Trennmaschine und die zum elektrochemischen Trennen verwendeten Generatoren können auch zum elektroerosiven Trennen genutzt werden. Die technischen Parameter der nunmehr auch zum elektroerosiven Trennen geeigneten EAVTM 500 können der Tafel 2 entnommen werden.

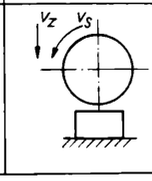
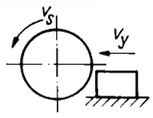
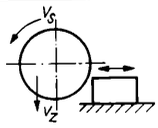
Bezeichnung	Kappschnitt	Fahrschnitt	Schwingschnitt
Bewegung des Werkstücks	Werkstück ruht	Werkstück bewegt sich mit v_y	Werkstück schwingt mit v_y hin und her
Bewegung der Trennscheibe	Trennscheibe rotiert und bewegt sich mit v_z	Trennscheibe rotiert	Trennscheibe rotiert und bewegt sich mit v_z
Prinzip			

Bild 1. Bewegungsarten beim Trennen mit rotierender Trennscheibe

4. Technologische Erfahrungen beim elektroerosiven Trennen mit rotierender Scheibenelektrode

Die mit der realisierten elektroerosiven Versuchsstromanlage durchgeführten Trennversuche erbrachten bereits wertvolle Ergebnisse. Durch den Wegfall der geschlossenen Arbeitskabine ist der maschinelle Grundaufbau der Trennmaschine weitgehend mit einer Schleifmaschine vergleichbar. Innerhalb der Arbeitswanne für die Aufnahme der Arbeitsflüssigkeit (Dielektrikum oder Elektrolyt) ist ein einfaches Spannen und Ausrichten der Werkstücke möglich. Die zum elektrochemischen Trennen genutzte geschlossene Arbeitskabine mußte durch eine offene Wanne mit Absaugung und Scheibenabdeckung ersetzt werden, da sich infolge der durch die hohe Drehzahl der Trennscheibe bedingten Zerstäubung der zum Erodieren verwendeten Öle ein Öl-Luft-Gemisch bildete, welches beim Auftreten von Funken bzw. Lichtbögen zu Verpuffungen führte. Die Arbeitswanne hat sich gut bewährt. Verpuffungen treten nicht mehr auf. Die Absaugung ist zur Reduzierung der Geruchsbelästigung des Bedieners sowie zur Absaugung entstehender Dämpfe zweckmäßig.

Zum elektroerosiven Trennen werden im allgemeinen Spannungen zwischen 20 und 40 V verwendet. Daher sind die zum Betreiben von EC-Anlagen entwickelten Generatoren mit Spannungen bis 20 V, Schweißgleichrichter und Galvanogleichrichter zum Betreiben elektroerosiver Trennanlagen mit rotierender Scheibenelektrode verwendbar, was durch Versuche bestätigt wurde.

Tafel 3. Ausgewählte detaillierte Versuchsergebnisse

WERKSTOFF		WERKZEUG		ARBEITSPARAMETER				VERSUCHS-ERGEBNISSE		
Werkstoff	Abmessungen in mm	Werkstoff	Dicke in mm	U in V	v_u in m · s^{-1}	v_y, v_z in mm · s^{-1}	DE	b_s in mm	R_a in µm	P_s in cm² · min^{-1}
Kugellagerstahl (gehärtet)	35 × 15	NIRO-Blech	0,5	18	30	0,05	Wasser	1,1	7,8	1,0
	35 × 15	Al-Blech	1,0	18	40	0,05	Trafo-Öl	1,2	–	1,0
HSS/HM (Bi-Metall)	32 ∅	NIRO-Blech	0,5	18	30	0,05	Trafo-Öl	–	11,6	1,2
TITAN	20 ∅	Tiefzieh-blech	0,7	18	30	0,1	ED 2	1,1	–	1,6
Legierter Werkzeugstahl	40 × 15	NIRO-Blech	0,5	18	30	0,2	Trafo-Öl	1,2	17,0	4,0
Nimonic	30 × 15	Tiefzieh-blech	0,7	18	30	1,2	ED 2	1,2	15,0	1,5
Wolfram	16 ∅	NIRO-Blech	0,5	18	30	0,05	Trafo-Öl	0,6	6,5	0,2
Hartmetall	70 × 30	Schwarz-blech	0,7	18	30	0,05	ED 2	2,2	6,2	1,0

Der Dielektrikakreislauf kann durch industriell gefertigte Tanks, Pumpen, Filter und Separatoren problemlos realisiert werden. Es muß allerdings auf ölresistente Werkstoffe geachtet werden. Auf die beim elektrochemischen Trennen übliche Druckkammer um den Arbeitsspalt herum kann verzichtet werden, was zu einer wesentlichen Verbesserung der Trenntechnologie führt. Das Werkstück befindet sich in einem Flüssigkeitsbad. Einer Automatisierung der Zu- und Abfuhr einschließlich dem Spannen der zu trennenden Werkstücke steht prinzipiell nichts im Wege.
Um mit der entwickelten Trennanlage ein Trennen im Kapp-, Fahr- und Schwingschnitt zu ermöglichen (Bild 1) wurden elektromechanische Antriebe für die x-, y- und z-Achse vorgesehen. Im Kappschnitt ergeben sich die besten Trennergebnisse beim Trennen ohne Druckkammer.
Die Wahl der Vorschubgeschwindigkeit entscheidet wesentlich darüber, welches Wirkprinzip zum Trennen genutzt wird. So sind bei sonst gleichen Bedingungen in Abhängigkeit von der Vorschubgeschwindigkeit bei Verwendung von Erodieröl und Leitungswasser funkenerosives Trennen, Trennen mit Lichtbogen sowie Elektrokontakttrennen möglich. Von uns wurden als Arbeitsflüssigkeiten zum elektroerosiven Trennen Leitungswasser, Erodierflüssigkeit ED 2 und Transformatoröl verwendet. Sie eignen sich gut zum Trennen. Transformatoröl erfordert jedoch eine besonders leistungsfähige Absaugung, da beim Trennen eine starke Rauchentwicklung eintritt. Obwohl alle diese Dielektrika beim Trennen sehr schnell verschmutzen, können sie nach unseren Erfahrungen auch ohne Filtersysteme lange benutzt werden. Für die Trennscheiben wurden Schwarz- und Tiefziehblech, Niro-Blech und Messingblech verwendet. Der Trennscheibenwerkstoff beeinflußt sehr wesentlich die Schnittqualität, besonders die Gratbildung und auch den Trennscheibenverschleiß. Obwohl beim Trennen mit der beschriebenen elektroerosiven Trennanlage nur Trennscheiben bis 360 mm Durchmesser verwendet wurden, konnten auch bei relativ kleiner Generatorleistung relativ große Werkstückquerschnitte getrennt werden. Voraussetzung dafür ist die Möglichkeit des Betreibens der Maschine im Schwingschnitt. Bei starrer Werkstückspannung und richtig gewähltem Vorschub arbeitet die elektroerosive Trennmaschine mit rotierender Trennscheibe stabil. Das Trennen läßt sich dann automatisieren.

5. Arbeitsergebnisse beim elektroerosiven Trennen

Es wurden Werkstücke aus Hartmetall, Wolfram, Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoff, Molybdän, Titan, gehärtetem Kugellagerstahl, rost- und säurebeständigem Stahl, hochwarmfestem Stahl, Grauguß, Gußmagnetwerkstoff und Bi-Metall elektroerosiv getrennt. Das Trennen von Wolfram, Wolfram-Kupfer-Verbundwerkstoff und Molybdän gestaltete sich am schwierigsten.
Die Trennscheiben waren Vollscheiben von 0,5 bis 0,8 mm Dicke und 200 bis 360 mm Durchmesser aus den im 3. Abschnitt genannten Werkstoffen. Die Drehzahlen lagen im Bereich von 1500 bis 3000 min^{-1}. Der Werkzeugverschleiß ist sehr stark vom Elektrodenwerkstoff und von der Vorschubgeschwindigkeit abhängig. Die erzielten Schnittgeschwindigkeiten liegen je nach Werkstoff und Werkstoffabmessungen im Bereich von 0,01 bis 4 mm s^{-1}. In den meisten Fällen waren bei einer Arbeitsspannung von $U = 18$ V Arbeitsstromstärken von 75 bis 450 A ausreichend.
Tafel 3 enthält einige detaillierte Arbeitsergebnisse beim Trennen verschiedener Werkstoffe und Werkstückprofile.

6. Zusammenfassung

An der Ingenieurhochschule Mittweida wurde eine elektroerosive Trennanlage mit rotierender Scheibenelektrode realisiert. Es wurde gezeigt, daß eine solche Anlage unter Verwendung industriell gefertigter Bauteile aufgebaut werden kann. Diese Anlage hat ihre Leistungsfähigkeit beim Trennen schwer spanbarer Werkstoffe, besonders von Hartmetall und gehärteten Stählen sowie Bi-Metallen bewiesen.

Literatur

[1] Hochgeschwindigkeits-Elektroentladungssäge und Hochgeschwindigkeits-Lichtbogenentladungsmaschine. Firmenschrift der Mitsubishi Heavy Industries, LTD. und Ekomix Corporation
[2] *Brandt, H.; Reitz, K.:* Bearbeitung korrosionsbeständiger und hochwarmfester Stähle. Werkstatt und Betrieb 114 (1981) 6, S. 353 – 360
[3] *Brandt, H.; Reitz, K.:* Bearbeitung korrosionsbeständiger und hochwarmfester Nichteisenmetalle. Werkstatt und Betrieb 114 (1981) 7, S. 425 – 438

EA 5364

Toxische Abprodukte und umweltgerechte Gestaltung des elektrochemischen Metallabtrages

K. Nestler, KDT; H. Wicht, KDT; Karl-Marx-Stadt

Mit der Entwicklung und dem Einsatz harter, zäher und hochwarmfester Werkstoffe gewannen als Alternative zu herkömmlichen spannenden Verfahren seit etwa 3 Jahrzehnten nichtkonventionelle Bearbeitungsverfahren zunehmend an Bedeutung. Eine unter diesen abtragenden Methoden ist die elektrochemische Metallbearbeitung, bei der der zu bearbeitende Werkstückwerkstoff in einer strömenden Elektrolytlösung mit Wirkstromdichten $J > 10\,A/cm^2$ anodisch gezielt aufgelöst wird.
Mit technologischen Realisierungsmöglichkeiten, wie elektrochemisches Raumformen (Senken, Schneiden), elektrochemisches Formabtragen (Entgraten, Kalibrieren), aber auch Kombinationen mit mechanischen bzw. thermischen Komponenten zur Intensivierung des Metallabtrags (Schleifen, Schneiden), hat sich der prinzipiell in einer elektrolytischen Zelle stattfindende anodische Metallabtrag ein breites Anwendungsfeld erschlossen. Seien es komplizierte Konturen bei der Gesenkherstellung, kompliziert gestaltete Funktionsflächen an flachen Bauteilen, schwierige Entgratprobleme oder mit mechanischen Techniken nur unter hohem Aufwand zu schneidende Werkstoffe, überall dort bietet die ECM-Technik mit höherer Arbeitsproduktivität effektive Lösungen.
Die erfolgreiche Anwendung der ECM-Technik erfordert beim Anwender nicht nur Kenntnisse aus den Ingenieurwissenschaften, sondern bedingt durch eine Reihe sowohl gleichzeitig als auch nacheinander ablaufender elektrochemischer und chemischer Reaktionen ein bestimmtes chemisches Grundwissen über das chemische Verhalten der verwendeten Elektrolytlösungen, des eingesetzten Werkstückwerkstoffes und insbesondere durch Legierungsbestandteile sowie Eigenschaften der durch elektrochemische Reaktionen entstandenen Reaktionsprodukte. Der damit in engem Zusammenhang stehenden Frage der Vernichtung und Entsorgung der Abprodukte wurde zwar in den Anfangsjahren der ECM-Technik vom Anwender noch wenig Bedeutung beigemessen, aber seit etwa 10 Jahren durch eine Vielfalt von schutzfähigen Lösungen begegnet. Dabei spielen die entstehenden toxischen Abprodukte Chromat und Nitrit eine dominierende Rolle [1] [2].

1. Betriebliche Situation

In Abhängigkeit vom Werkstückwerkstoff und von der Elektrolytlösung treten während des elektrochemischen Abtragprozesses lösliches Chromat und Nitrit auf. Infolge Hautkontakt können Bediener allergen geschädigt werden. Es entstehen hauptsächlich durch das Chromat verursachte Kontaktekzeme, deren Pathogenese langwierig ist. Begünstigend dabei wirkt das alkalische Milieu der Elektrolytlösung und der hohe Gehalt an Neutralsalzen, so daß aus dermatologischer Sicht ein Erscheinungsbild wie beim Zementekzem entsteht [3]. Es sind Beispiele aus Anwenderbetrieben bekannt, bei denen die hautärztliche Diagnose Chromat-Ekzem lautet. Des weiteren haben Betriebe Schwierigkeiten bei der Deponierung eines chromathaltigen Schlammes.

2. Aufgabenstellung

Abgeleitet aus der gesellschaftlichen und gesetzlichen Forderung zur Unschädlichmachung auftretender toxischer Abprodukte [4] waren Labor- und Betriebsversuche der Gegenstand vorliegender Arbeiten, deren Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt wurden,

Dr. rer. nat. *Klaus Nestler* ist wissenschaftlicher Mitarbeiter, Prof. Dr. sc. techn. *Hans Wicht* ist Hochschullehrer an der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt, Wissenschaftsbereich Chemie.

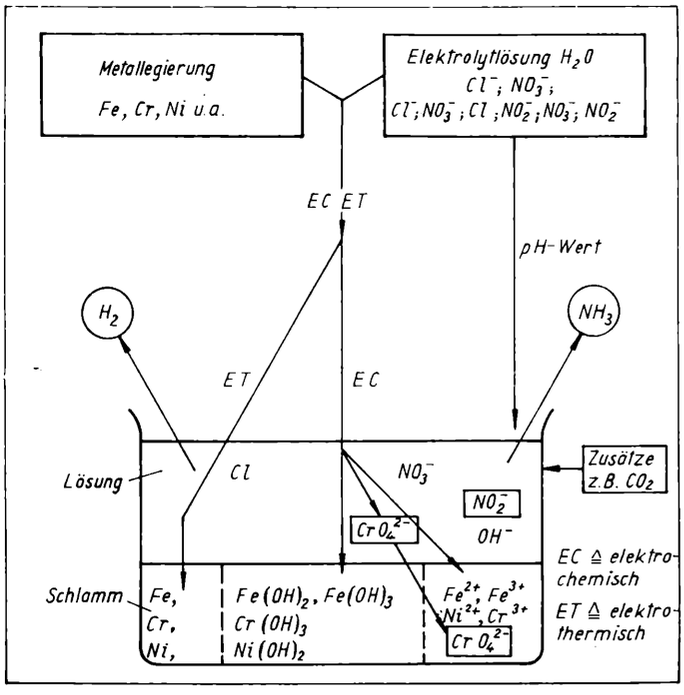


Bild 1. Abtragprodukte beim elektrochemischen bzw. elektrochemisch-elektrothermischen Metallabtrag (Cl ist durch Cl^- zu ersetzen)

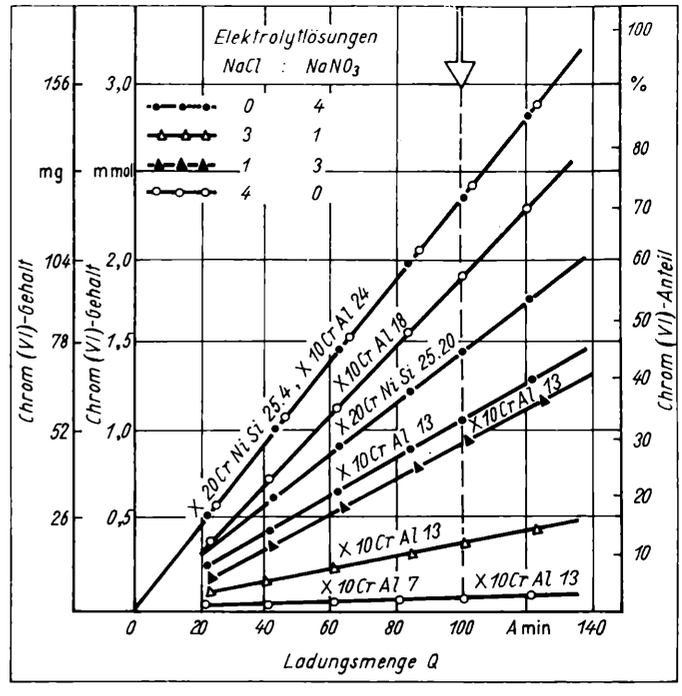


Bild 2. Chrom(VI)-Restgehalte beim elektrochemischen Schneiden

- dem Technologen in der metallverarbeitenden Industrie Berechnungsgrundlagen zur Verfügung zu stellen
- Erkenntnisse über ablaufende elektrochemische Reaktionen an ausgewählten Elektrolytlösungen und chrom- bzw. chrom-nickellegierten Werkstoffen zu erweitern
- quantitative Aussagen über die sich unter bestimmten Auflösungsbedingungen bildenden Chromatmengen zu erhalten
- quantitative Aussagen über die Reduktion von Chromat zu bekommen
- die Übertragbarkeit auf den industriellen Anwendungsfall zu prüfen
- Regeln abzuleiten für eine beherrschbare Chromatkonzentration in der Elektrolytlösung und den Reaktionsprodukten.

3. Theoretische Grundlagen anodischer Metallauflösungsreaktionen

Betrachten wir nun die elektrolytische Zelle und gehen mit Hilfe der theoretischen Erkenntnisse eine Reihe von Reaktionsabläufen durch, die letztlich zur Bildung von toxischen Abprodukten führen. Das Wissen darüber ist Ausgangspunkt für Maßnahmen zur umweltgerechten Gestaltung des technologischen Prozesses. Entsprechende Konsequenzen für eine Beseitigung, also Entgiftung, oder ein gänzliches Vermeiden lassen sich ableiten.

Die beiden am häufigsten verwendeten Neutralsalze Alkalichlorid und -nitrat haben gemeinsame und unterschiedliche Elektrolyteigenschaften, die in Zusammenhang mit der anodischen Metallauflösung und weiterer sekundärer chemischer Reaktionen zu sehen sind.

Bild 1 zeigt schematisch, welche Abtragprodukte bzw. Reaktionsprodukte beim elektrochemischen, aber auch beim kombinierten elektrochemisch-elektrothermischen Metallabtrag auftreten können. Die weiteren Überlegungen sollen am Beispiel chrom- und chrom-nickel-legierter Eisenwerkstoffe erfolgen. Der Legierungsbestandteil Eisen löst sich in beiden wäßrigen Elektrolytlösungen gemäß Gleichung (1) zum zweiwertigen Eisen (Eisen(II)) auf, das als Eisen(II)-hydroxid gefällt wird [5].

$$Fe + 2\,H_2O \rightarrow Fe(OH)_2 + H_2 \qquad (1)$$

Das in chromlegierten Stählen anteilige Chrom wird im Ergebnis der anodischen Reaktion in beiden Lösungen zunächst vollständig zum Chrom(VI) oxydiert (2), das als lösliches Alkalichromat vorliegt.

$$Cr + 4\,H_2O \rightarrow CrO_4^{2-} + 2\,H^+ + 3\,H_2 \qquad (2)$$

In Nitratlösungen wird in einer katodischen Reduktion (3) neben Ammoniak und zunehmender Alkalisierung der Lösung teilweise und stromdichteabhängig Nitrit gebildet.

$$5\,Fe + 2\,NO_3^- + 7\,H_2O \rightarrow NO_2^- + NH_3 + OH^- + 5\,Fe(OH)_2 \qquad (3)$$

Unterschiedlich ist die weitere Umsetzung des gebildeten Eisen(II)-hydroxids. In Alkalichloridlösungen wird es langsam mittels Luftsauerstoff zu rotbraunem Eisen(III)-hydroxid oxydiert (4).

$$4\,Fe(OH)_2 + 2\,H_2O + O_2 \rightarrow 4\,Fe(OH)_3 \qquad (4)$$

In Nitratlösungen kann darüberhinaus eine Sekundärreaktion (5) einsetzen, die ebenfalls unter Verbrauch von Nitrat toxisch wirkendes Nitrit bildet.

$$4\,Fe(OH)_2 + 2\,NO_3^- + 2\,H_2O \rightarrow 4\,Fe(OH)_3 + 2\,NO_2^- \qquad (5)$$

Die Reaktionen (4) und (5) laufen parallel, aber auch nacheinander ab und sind zum einen als chemische Reaktionen nicht an die Elektronenbilanz gebunden (gemeint ist damit die geflossene Ladungsmenge und die über sie und die Abtragmasse zugängliche Stromausbeute für die Haupt- und Nebenreaktionen). Zum anderen laufen diese Reaktionen als Redoxreaktionen ohne äußere Stromquelle ab und werden dabei von unterschiedlichen Potentialdifferenzen, Konzentrationsgradienten, Gleichgewichtslagen und reaktionskinetischen Hemmungen nicht unerheblich beeinflußt.

4. Theoretische Grundlagen der Vernichtung toxisch wirkender Chromate

Unsere Modellvorstellungen basieren auf einer vollständigen anodischen Oxydation anteiliger Chromgehalte der zu bearbeitenden Legierung. In einer Sekundärreaktion entscheidet die verfügbare Eisen(II)-hydroxidmenge über den noch verbleibenden Restgehalt an Chrom(VI). Das in beiden Elektrolytarten gebildete Eisen(II)-hydroxid ist verantwortlich für die unmittelbar nach der Bildung des Chromats einsetzenden Reduktion zum dreiwertigen Chrom (Chrom(III)), das nicht toxisch wirkt und als Chrom(III)-hydroxid ausgefällt wird. Mit Gleichung (6) wird zum Ausdruck gebracht, daß man für 1 mol Chromat zu dessen Reduktion 3 mol Eisen(II)-hydroxid benötigt.

$$3\,Fe(OH)_2 + CrO_4^{2-} + 4\,H_2O \rightarrow 3\,Fe(OH)_3 + Cr(OH)_3 + 2\,OH^- \qquad (6)$$

Das anodisch gebildete Eisen(II)-hydroxid besitzt bei den in der ECM-Technik üblichen pH-Werten ($7 < pH < 10$) ein sehr starkes Reduktionsvermögen und ist in der Lage, mit mehreren Komponen-

ten der Elektrolytlösungen zu reagieren:

- mit Chromat
- mit Nitrat
- mit Sauerstoff.

In Nitratlösungen laufen als Konkurrenzreaktionen zur „inneren Chromatreduktion" mittels Eisen(II)-hydroxid folgende ab:

— Oxydation des Eisen(II)-hydroxids mittels Nitrat wie es Gleichung (5) beschreibt und mit Bild 3 grafisch veranschaulicht werden kann

— Oxydation des Eisen(II)-hydroxids mit Sauerstoff, der über den Zutritt aus der Luft in beträchtlichen Mengen reagieren kann. Sauerstoff kann auch direkt an der Anode entstehen, wenn die Lösungsanode blockiert wird. Kennzeichen dieser Sauerstoffentwicklung ist eine auf die Eisenauflösung bezogene Stromausbeute unter 100%. Gleichung (7) beschreibt die Bruttoreaktion.

$$NO_3^- + 2\,H_2O \rightarrow NH_3 + OH^- + 2\,O_2 \qquad (7)$$

Mit dem durch diese elektrochemische Konkurrenzreaktion gebildeten Sauerstoff kann besonders in passivierenden Elektrolytlösungen wie Nitrat anodisch gebildetes Eisen(II)-hydroxid schnell und in größeren Mengen oxydiert werden.

Durch definierte Dosierung (abhängig vom Abtragvolumen und vom Chromgehalt) lassen sich Redoxreaktionen mit reduzierend wirkenden Schwefel- und/oder Stickstoffverbindungen realisieren, wie sie z.B. Gleichung (8) verdeutlicht. Dabei dürfen aber die chemischen und elektrochemischen Eigenschaften der Elektrolytlösung nicht gestört werden (Senkung der Abtragleistung, Senkung der Stromausbeute durch eingebrachte Fremd-Ionen). Einer Absenkung des pH-Wertes wird mit einem alkalisierenden Fällungsmittel begegnet [6].

$$2\,CrO_4^{2-} + 2\,H_2O + 2\,OH^- + 3\,S_2O_4^{2-} \rightarrow 2\,Cr(OH)_3 + 6\,SO_3^{2-} \qquad (8)$$

Bild 7 enthält den Zusammenhang zwischen einem Chrom(VI)-Restgehalt und der zuzusetzenden Masse an Dithionit.

5. Experimentelle Untersuchungen

In Modellversuchen zum elektrochemischen Schneiden [7] und Senken [8] höherfester Stähle wurde der Einfluß von Chrom und Nickel auf die Bildung oben dargestellter toxischer Abprodukte in Chlorid-, Nitrat- und Mischlösungen als Funktion der Ladungsmenge untersucht. Als Werkstückwerkstoffe kamen zum Einsatz:
X 10 CrAl 7, X 10 CrAl 13, X 10 CrAl 18, X 10 CrAl 24,
X 20 CrNiSi 25.4, X 15 CrNiSi 20.13, X 15 CrNiSi 25.20
Es wurden 4 Elektrolytlösungen eingesetzt:

100% Natriumchlorid,	100% Natriumnitrat
75% Natriumchlorid +	25% Natriumnitrat
25% Natriumchlorid +	75% Natriumnitrat.

Im Bild 2 sind die über der Ladungsmenge erhaltenen Chrom(VI)-Restgehalte für obige Werkstückwerkstoffe und Elektrolytlösungen für das Beispiel elektrochemisches Schneiden dargestellt. Die rechte Ordinate sagt aus, mit welchem prozentualen Chrom(VI)-Restgehalt man maximal rechnen kann, indem man vom Schnittpunkt der jeweiligen Geraden mit dem Pfeil ausgeht. Zur Vernichtung auftretender Chrom(VI)-Gehalte wurden Modell- und Betriebsversuche durchgeführt. Bild 3 zeigt zunächst EC-Schneid- und Senkversuche im Labormaßstab, in denen als Werkstoff Mk 3 Al bzw. St 38 bearbeitet wurde und das anodisch gebildete Eisen(II)-hydroxid als Reduktionsmittel für Chromat fungiert.

Es wurden 4 Elektrolytlösungen verwendet und der Rückgang der Chromat-Konzentration in Abhängigkeit von der Ladungsmenge verfolgt. Je nach Potentialdifferenz der möglichen korrespondierenden Redoxpaare in einer entsprechenden Elektrolytlösung konkurrieren in Chloridlösungen
Eisen(II)-hydroxid mit Chromat und/oder Sauerstoff und in Nitratlösungen
Eisen(II)-hydroxid mit Nitrat, Chromat und Sauerstoff.

Das Ergebnis kann eine vollständig ablaufende „innere Reduktion" des gebildeten Chromats bis zu beträchtlichen Restmengen an Chromat in der Elektrolytlösung sein. Mittels POURBAIX- und Oxydationszustandsdiagrammen lassen sich die Reaktionsgleichgewichte möglicher korrespondierender Redoxpaare in Abhängigkeit vom pH-Wert grafisch auswerten. Bild 4 zeigt das POURBAIX-Diagramm für die angeführten Reaktionen [9].

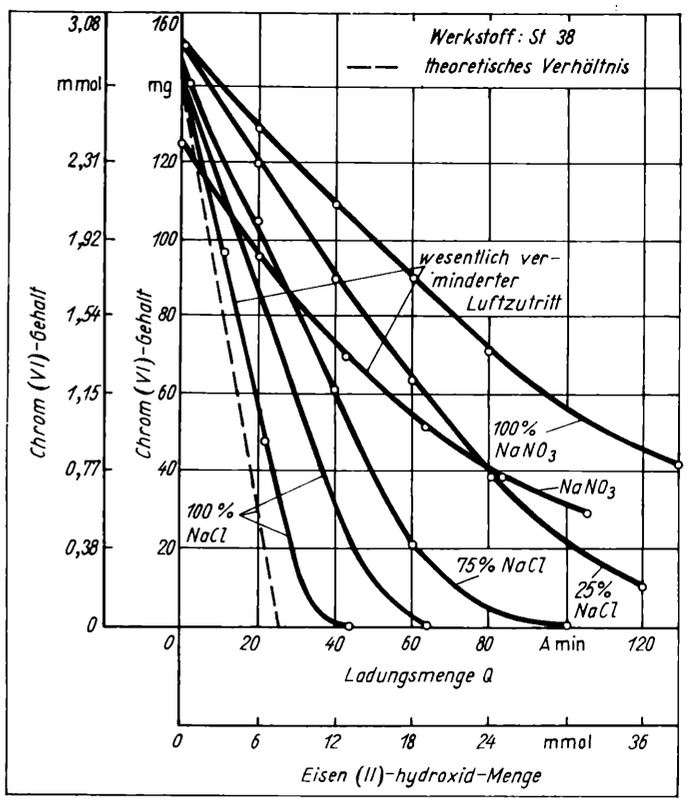


Bild 3. Reduktion von Chrom(VI)-Gehalten

Aus Gleichung (6) geht hervor, daß man bei Bearbeitung eines Chromstahls, der bis zu 23,7 Masse-% (= 25 Mol-%) Chrom enthält, in einer Chloridelektrolytlösung keinen Chromat-Restgehalt feststellen dürfte. Bedingung dafür ist eine Elektrolytlösung, die frei von Sauerstoff ist! Die praktische Realisierung wäre sehr aufwendig. So findet man Chromat-Restmengen, weil das Eisen(II)-hydroxid durch von der Lösung aufgenommenen Luftsauerstoff teilweise oxydiert wird. Mit Bild 3 und Gleichung (4) erfährt die vermindert ablaufende „innere Chromatreduktion" in Chloridlösungen eine Erklärung. Deutlich wird mit zunehmendem Mitratgehalt und mit einem nicht verminderten Sauerstoff- bzw. Luftzutritt, daß man beträchtliche Ladungsmengen benötigt, um den Chromatgehalt zu reduzieren.

Das theoretische Verhältnis von Fe:Cr = 3:1 in einer sauerstofffreien Chloridlösung verschiebt sich bei Luftzutritt zu 3,8:1 und verändert sich mit der vorhandenen Nitratkomponente über 6:1 bis 12:1, in Extremfällen bis 38:1. Das bedeutet, daß man zur Reduktion einer bestimmten Chromatkonzentration wesentlich mehr Eisen auflösen und damit Ladung verbrauchen muß, weil die Konkurrenzreaktionen mit Nitrat und Sauerstoff größere Mengen des gebildeten Eisen(II)-hydroxids oxydieren und damit der Chromatreduktion entziehen (vgl. Bild 5).

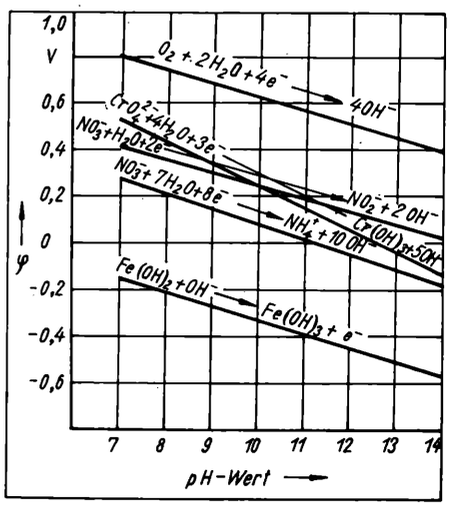


Bild 4
POURBAIX-Diagramm

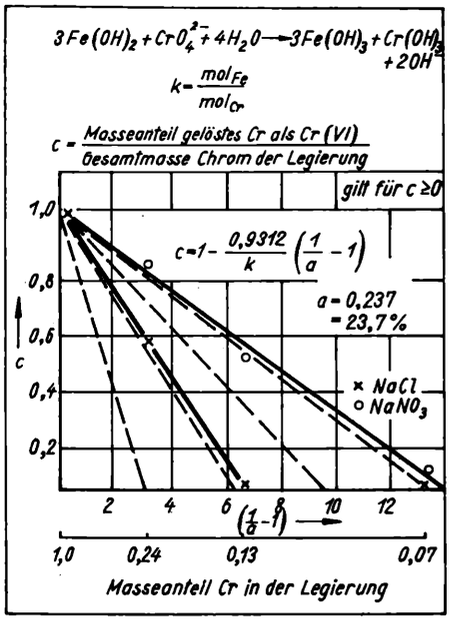


Bild 5. Chrom(VI)-Reduktion in verschiedenen Elektrolytlösungen

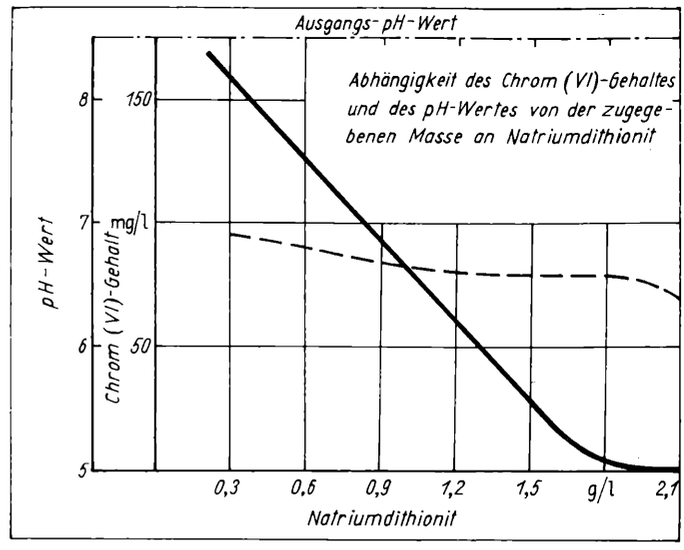
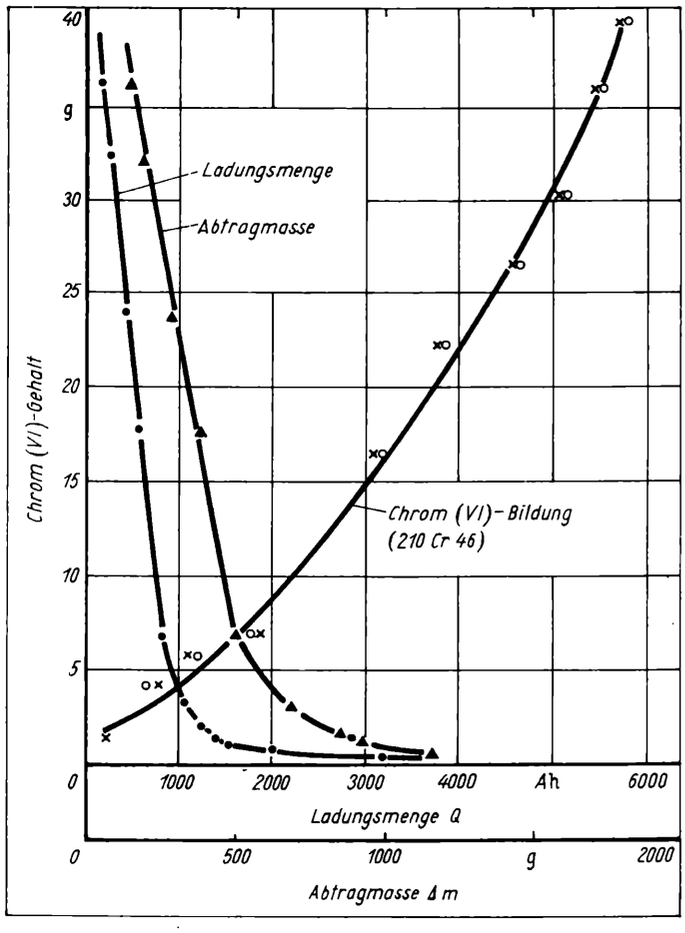


Bild 7. Reduktion von Chrom(VI) mittels Natriumdithionit

In Betriebsversuchen zum EC-Schleifen [10] wurde der Wirkungsgrad der „inneren Chromat-Reduktion" durch abwechselnde Bearbeitung von chromlegierten (210 Cr 46) und chromfreien Werkstoffen untersucht (135 WV 4, 142 WCr 13). Bild 6 zeigt die Bildung und Abnahme eines Chrom(VI)-Restgehaltes in Abhängigkeit von der Metallmasse (Abtragmasse) bzw. von der Ladungsmenge.
Sind derartige Werkstoffabfolgen bei elektrochemischer Bearbeitung nicht möglich, werden Chrom(VI)-Gehalte durch Zugabe von reduzierend wirkenden Schwefel- und/oder Stickstoffverbindungen entgiftet. Bild 7 zeigt am Beispiel von Chrom(VI)-Gehalten, wie sie bei elektrochemischer Senkbearbeitung chromhaltiger Legierungen in reinen Nitratlösungen anfallen, deren wirksame Reduktion mit Natriumdithionit (Gleichung 8). Auf der Ordinate kann man die Chrom(VI)-Konzentrationsdifferenz vorgeben und erhält auf der Abszisse die entsprechende Massendifferenz an zu dosierendem Natriumdithionit. Die eintretende Senkung des pH-Wertes wird mit einem alkalisierendem Fällungsmittel begegnet [6]. Auf diese Weise werden die Abtragbedingungen wie pH-Wert, Fremd-Ionengehalt und Stromausbeute konstant gehalten.

Bild 6. Betriebsversuche zum elektrochemischen Schleifen chromhaltiger und chromfreier Werkstoffe



6. Ergebnisse der Untersuchungen

Ausgehend von der gesellschaftlichen Notwendigkeit der Gestaltung abproduktarmer bzw. abproduktfreier Technologien und entsprechend dem internationalen Trend wurden theoretische und experimentelle Untersuchungen zur Charakterisierung der beim elektrochemischen Abtrag zu erwartenden Reaktionsprodukte durchgeführt. Mit der Behandlung der anodischen Auflösungsmechanismen für die Hauptlegierungsbestandteile ergeben sich Schlußfolgerungen für die Stoffbilanz beim EC-Abtrag unter Verwendung von Alkalichloriden und -nitraten.
Aus der Toxizität der löslichen Chromate müssen resultierende Entgiftungsmaßnahmen abgeleitet werden. Der Querschnitt durch die meisten patentrechtlich geschützten Verfahren läßt einen hohen anlagentechnischen Aufwand erkennen und kann im Falle nachgeschalteter Entgiftungs- und Reinigungsanlagen für eine EC-Anlage in der Höhe der Kosten für die eigentliche Bearbeitungsanlage liegen. Für die praktische Gestaltung des elektrochemischen Abtragprozesses kann der zu erwartende Chromat-Restgehalt berechnet, in Relation zum Elektrolytvolumen gesetzt und Entgiftungsmaßnahmen angegangen werden. Die anfallenden Chrom(VI)-Restmengen sind abhängig von bzw. lassen sich beeinflussen durch:

- Chromgehalt der Legierung
- Art der Elektrolytlösung
- Mengenverhältnis der Bestandteile der Elektrolytlösung
- zielgerichteter Abbau während elektrochemischer Bearbeitung
- Wahl der Wirkbedingungen (elektrochemische mit elektrothermischen kombinieren, konstruktive Lösungen zur Verminderung des Luftzutritts)
- nachfolgende Entgiftung mit reduzierend wirkenden Chemikalien, die die Abtragleistung nicht verschlechtern.

7. Schlußfolgerungen

Für eine umweltgerechte Gestaltung des EC-Abtrages wird vorgeschlagen,

- daß sich der Anwender über theoretische Zusammenhänge der chemischen Seite informiert und somit von vornherein die anfallenden Chromatmengen abschätzen kann
- die bei Bearbeitung chromlegierter Stähle anfallenden Chrom(VI)-Restmengen durch eine alternierende Bearbeitung mit chromarmen bis chromfreien Werkstoffen zu koppeln
- Mischelektrolyte einzusetzen
- Chrom(VI)-Restmengen mittels chemischer Substanzen, die die Abtragleistung nicht verringern, im Prozeß zu reduzieren,

— eine reduktive Behandlung des frisch gefällten Abproduktschlammes vorzunehmen, da er in der Entstehungsphase ein hohes Adsorptionsvermögen für lösliche Chromate besitzt
— vor Deponie eines Abproduktschlammes seinen Chrom(VI)-Gehalt unter 0,2 mg Cr(VI)/l und den pH-Wert auf 7,5 zu bringen, da infolge Alterung des Schlammes adsorbierte Chrom(VI)-Mengen wieder abgegeben werden,
— Elektrolytlösungen nicht ins Abwasser abzugeben, sondern ständig im Kreislauf zu führen und nach erfolgter Entgiftung für erneute Konditionierung zu sorgen.

Die Arbeitsschutzmaßmahmen an den Anlagen sind wirkungsvoll zu gestalten und die technische Ausrüstung ist so vorzunehmen, daß keine Elektrolytnebel und verspritzte Lösung in den umgebenden Raum gelangen können. Mittels halbquantitativer Methoden auf der Basis von Farbvergleichsstandards können an Ort und Stelle die kritischen Giftstoffgehalte ermittelt werden [11].

Literatur

[1] *Mauz, W.:* Elektrolytaufbereitung und -entsorgung VDI-Berichte, Nr. 240. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH 1975
[2] *Simon, H.:* Werkstatt und Betrieb 112 (1979) 1, S. 19–23
[3] *Zelger, J.:* Zur Klinik und Pathogenese des Chromat-Ekzems. Arch. klin. exp. Derm. 218 (1964), S. 499–542
[4] *Martinetz, D.:* Immobilisation, Entgiftung und Zerstörung von Chemikalien. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1980
[5] *Rößner, E.:* Dissertation. Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt 1973
[6] *Wicht, H.; Nestler, K.; Neubert, W.; Wienzek, M.:* Verfahren zur Entgiftung von toxische Oxokomplex-Ionen enthaltenden Elektrolytlösungen. DD-WP – Anmeldung Az C 25 F/232887 7 vom 31. 8. 1981
[7] *Trischmann, U.:* Diplomarbeit. Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, Sektion Chemie und Werkstofftechnik 1981
[8] *Pürzel, A.:* Diplomarbeit. Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, Sektion Chemie und Werkstofftechnik 1982
[9] *Rößner, E.; Nestler, K.; Wicht, H.:* Vortrag. Hauptjahrestagung der Chemischen Gesellschaft der DDR, Karl-Marx-Stadt 1980
[10] *Pürzel, A.:* Ingenieurarbeit. Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, Sektion Chemie und Werkstofftechnik 1981
[11] *Wicht, H.;* u.a.: Forschungsbericht zur Leistungsstufe A 4. Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt, Sektion Chemie und Werkstofftechnik 1980

EA 5363

Wir empfehlen Ihnen zur Vertiefung der dargestellten Problematik

Elektrotechnologie

Herausgeber: *H. Conrad; R. Krampitz,* Berlin: VEB Verlag Technik 1983. 1. Auflage. 399 Seiten, 304 Bilder, 35 Tafeln. Kunstleder 38,— Mark.
Bestell-Nr. 553221 1

Dieses Buch vermittelt eine Übersicht über Wirkungsweise und Einsatzmöglichkeiten elektrotechnologischer Verfahren mit dem Ziel, eine wissenschaftlich begründete Unterstützung für deren Anwendung zu geben. Es ist geeignet
— als Nachschlagewerk und für die Weiterbildung von in Entwicklung, Technologie und Rationalisierungsmittelbau tätigen Wissenschaftlern und Ingenieuren
— in allen Zweigen der Volkswirtschaft für die Vermittlung von Grundlagenkenntnissen zu elektrotechnologischen Verfahren, der Beschleunigung ihrer Einführung und der Erleichterung der Auswahl der effektivsten Verfahren und
— als Grundlage für die Ausbildung von Ingenieuren der Fachrichtungen Elektrotechnik auf technologischem Gebiet in den Vertiefungsrichtungen Elektrotechnologische Verfahren sowie Elektrowärme und Galvanotechnik, des Maschineningenieurwesens und der Verfahrenstechnik an Technischen Universitäten und Hochschulen.

Die Redaktion

Feste elektrische Verbindungen mit AlCu-Leitern bei Schwingbelastung

W. Richter, KDT; U. Hänel; Karl-Marx-Stadt

1. Allgemeine Einführung

Kupferbeschichtete Aluminium-Leiterwerkstoffe sind als „AlCu-Material" in die Praxis eingeführt. In größerem Umfang werden AlCu-Leiter anstelle von Cu-Leitern nach den anwendungstechnischen Informationen [1] des Herstellers angewendet. Spezielle Hinweise zur Anwendung von AlCu-Leitern sind auch einigen Ergänzungsblättern zu [1] zu entnehmen. Vorausgegangene Untersuchungen [2] hatten gezeigt, daß bei statisch-mechanischer und zugleich elektrischer Belastung im Festkontakt ein AlCu-Draht von 2,5 mm² Querschnitt ein ähnliches Verhalten aufweist wie ein massiver Kupferdraht in der vorgeschriebenen Messingklemme. Diese Einschätzung ist das Ergebnis der Experimente nach TGL 21590 sowohl der Beurteilung des Spannungsabfalls zwischen Leiter und Klemme

a) im Dauerversuch
b) im Temperaturwechselversuch
c) bei zusätzlicher SO_2- bzw. NH_3-Schädigung der umgebenden Atmosphäre

als auch der Beurteilung des Korrosionsverhaltens. Wenn auch all diese Experimente unter statischen Bedingungen die Brauchbarkeit des AlCu-Leiters uneingeschränkt bestätigen, so bleibt die Frage offen, ob die Kombination einer mechanischen Wechselbelastung (dynamischer Fall) mit der noch zulässigen elektrischen Grenzbelastung, die zu $\Delta T = 50$ K führt, vom AlCu-Draht in der Messingklemme ertragen wird. Zur Beurteilung der Dinge sollte wieder der Spannungsabfall zwischen Draht und Klemme herangezogen werden, der nach Standard TGL 21590 unterhalb eines vorgegebenen Grenzwertes liegen sollte und der mit der Zeit nur gering steigen darf.
Die mechanische Wechselbelastung kann durch schwingende Bewegung erzielt werden. Mit einem Schwingtisch des Typs ST 80 ist es möglich, unterschiedliche Frequenzen und Amplituden (80 bis 40 Hz, $0 \cdots 1$ mm) zu realisieren. Im Bild 1 ist die Wirkungsweise des Schwingtisches prinzipiell dargestellt. Der Arbeitstisch T wird über ein Federsystem in eine Hubbewegung versetzt. Bei 50 Hz als Arbeitsfrequenz und den hier vorliegenden Bedingungen gilt zwischen dem Amplitudenausschlag A und der Maximalbeschleunigung b der Probe etwa folgende Relation

$$A\,(\text{mm}) \triangleq \frac{b}{10};\ F = m\,b\,.$$

So ist eine erste Information erzielbar.
A ist meßbar

a) durch die Bewegung eines „Meßkeils" am Arbeitstisch T gegenüber einem ruhenden Fixpunkt oder
b) durch ein zusätzliches Amplitudenmeßgerät des Typs „Vibrationsmesser VM 2 S".

Die Beschleunigung b des Systems wird meist als Vielfaches der Erdbeschleunigung g ausgedrückt.

2. Experimentelle Untersuchungen

Proben aus Al F13, Cu und AlCu standen nach verschiedenartiger Klimabehandlung für Schwingtischversuche zur Verfügung. Es war beabsichtigt, Aussagen über das elektrische und mechanische (Kriech-)Verhalten nach längerer dynamischer Belastung der Werkstoffe in Klemmkontakten (geschraubt) zu gewinnen. Als „Normal" wurde ein Silberdraht verwendet, mit dessen Hilfe eine Korrektur der ΔU-Werte durchgeführt werden konnte. Mit dem Ag-Draht wurde die Stromstärke normiert.

Professor Dr.-Ing. habil. *Walter Richter* ist außerordentlicher Professor, Dr.-Ing. *Ursula Hänel* ist Lehrer im Hochschuldienst an der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt, Sektion Chemie und Werkstofftechnik.

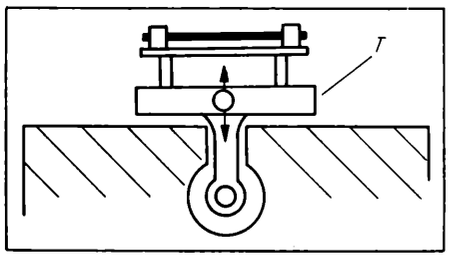


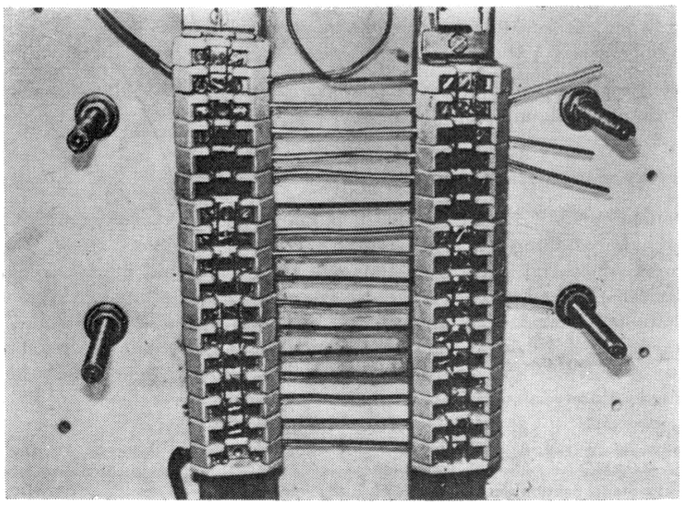
Bild 1
Arbeitstisch T mit Aufbauplatte

Die vorausgegangene Klimabehandlung erfolgte bei 343 K und 90 % relativer Luftfeuchte im Klimaschrank KPW-1/4 über $1 \cdots 200$ h. Es war auch möglich, bei Raumtemperatur über 1,5 Jahre gelagerte Proben in die Kontrolle einzubeziehen. Schließlich war es möglich, in H_2S bzw. SO_2-Atmosphäre Proben vorzubereiten (Kesternich-Test).
Die verschmutzten bzw. angegriffenen Oberflächen wurden nicht gereinigt, sondern blieben für praxisnahe Verhältnisse erhalten. Unter Beachtung der TGL 21001/03 erfolgte die Befestigung des Prüfdrahtes in Aufreih-Buchsen-Klemmen mit Schrauben vom vorgeschriebenen Durchmesser. Für jeden Versuch wurden neue Klemmen verwendet. Nach TGL 16554/02 mußten die Kontaktschrauben einheitlich mit einem Drehmomentenschraubendreher — mit 0,8 Nm — angezogen sein. Auf dieses Detail wurde im Interesse der Vergleichbarkeit der Ergebnisse viel Wert gelegt. Die in Schienen gestapelten Aufreih-Buchsen-Klemmen sowie die Anordnung der Schienen auf einer Montageplatte werden im Bild 2 dargestellt.
Aus praktischer Sicht sind zwei Belastungsfälle interessant. Im Fall des beiderseitig eingespannten Leiters (Normalfall) handelt es sich darum, daß der Draht samt der zugehörigen Klemmen bewegt wird. In einem zweiten Fall verbindet der Draht ein bewegtes System mit einem Festsystem, wodurch die Belastungen nicht nur des Kontaktes sondern des Drahtes erheblich verschärft werden. Neben der mechanischen Belastung sollte — entsprechend der Problemstellung — gleichzeitig die elektrische Grenzbelastung realisiert werden, bei der eine Temperaturerhöhung des blanken Leiters um $\Delta T = 50$ K gegeben ist. Mit dem „Thermophil 2111" war es möglich, die Temperaturänderungen zu verfolgen. Eine Stromstärke von $i = 28{,}5$ A konnte als „Grenzstromstärke" für blankes AlCu 2,5 mm² festgelegt werden.
Die Messung des Spannungsabfalls am Festkontakt erfolgte mit einer Zweispitzenmethode während der vollen Belastung und unmittelbar zwischen Draht und Klemme. Dies ist zulässig. Auch der Übergangswiderstand kann auf diese Weise festgelegt werden. Im folgenden sind die Versuchsparameter zusammengestellt:

Schwingtisch-Frequenz: 50 Hz, Stromstärke: 28,5 A
Amplituden (Beschleunigungen) $0{,}2 \cdots 1{,}0$ mm; $(2 \cdots 10\ g)$
Belastungszeiten (h): 0,5; 5; 8,5; 10; 16; 60.

Um das Verhalten der AlCu-Drähte metallkundlich begründen zu können, wurden vor und nach der Schwingbelastung röntgenographische und metallographische Kontrollen durchgeführt.

Bild 2. Reihenschaltung der Kontakte mit der Aufbauplatte auf dem Schwingtisch



3. Experimentelle Ergebnisse

In TGL 21001/03 sind in Verbindung mit TGL 16554/03 die Forderungen an die Prüftechnik und an die Einordnung der Prüfergebnisse für Schwingbeanspruchung bei gleichzeitiger elektrischer Belastung niedergelegt. Die ersten systematischen Kontrollen erfolgten durch *Seifert* [3]. Er prüfte das Verhalten der Festkontakte Draht/Klemme bei gleichzeitig wirkender elektrischer Höchstbelastung und mechanischer Schwingbelastung im Falle der zweiseitigen Einspannung. Spätere Arbeiten von *Menzel* [4] und *Rauch* [5] bestätigten und ergänzten die erzielten Ergebnisse. Im Bild 3 ist das Verhalten der AlCu-Leiter bei verschiedener Vorbehandlung dargestellt. Man erkennt, daß für AlCu der Spannungsabfall relativ klein ist und sich mit der Zeit kaum ändert. Die Kurven 2 bis 5 entsprechen Klimabehandlungen von $5 \cdots 160$ h. Hierdurch entsteht eine zunehmende Cu_2O/CuO-Schichtdicke, deren Wirkung dem Bild entnehmbar ist. Die Kurve 1 wurde an einem Kupferdraht gewonnen. Die Kurven 7 und 8 sind mit Al-Leitern erzielte Ergebnisse. Die Spannungsabfälle sind zu hoch und die Änderung der Spannungsabfälle mit der Zeit zu groß. Festkontakte mit Al als Leiterwerkstoff sollten bei zusätzlicher Schwingbelastung nicht verwendet werden. Dagegen sind AlCu-Leiter ebenso wie Cu-Leiter für solche Fälle geeignet.
Eine ähnliche Erkenntnis ist dem Bild 4 zu entnehmen, wenn die Beschleunigung auf $5\ g$ gesteigert wird. Bei dieser extremen Belastung wird der Einfluß von Oberflächenschichten weitgehend verdeckt. Offenbar fritten die Oberflächenschichten; CuO bzw. $CuCO_3 \cdot Cu(OH)_2$ (aus der Klimabehandlung) werden unwirksam. *Seifert* [3] wies das Auftreten solcher Schichten nach, wenn eine Klimabehandlung vorausging.
Beachtenswert ist die Verformung in der Einspannstelle. Ohne rechnerische Kontrolle ist bereits zu vermuten, daß im Bereich kritischer Stellen Kriechprozesse auftreten, die zu einer Verfestigung der Kupferschicht führen. Dadurch sollte die Bewegung der Versetzungen im Al-Kern behindert werden. Der Spannungsabfall sollte sich so stabilisieren. Die einseitige, feste Einspannung gegen einen bewegten Schwingtisch wurde von *Rauch* [5] speziell untersucht. Es zeigte sich, daß bei AlCu-Drähten mitunter beste Werte (kleinste ΔU-Werte) gefunden wurden. Die Betriebszeit der sicheren Funktion war aber begrenzt. Cu-Draht in der festen Verbindung versagte durchweg eher als die AlCu-Kombination.
Beispielsweise traten im Fall hoher Belastung ($3\ g$, einseitige Einspannung) in 16-h-Versuchen bei Cu-Draht und Ms-Klemme-Kombinationen in mehr als der Hälfte der Verbindungen Ausfälle ein, die auf Bruch oder thermisches Kontaktversagen zurückzuführen waren.
Bei AlCu-Draht und Ms-Klemme-Kombinationen traten keine solchen Ausfälle auf.
Offenbar wirkt das „Cu-Rohr" um das Al stabilisierend, und das geringe spezifische Gewicht des Kernes vermindert die mechanische Belastung der Stelle der festen elektrischen Verbindung.

4. Versuch einer Analyse der Belastungsfälle bei Schwingtisch-Experimenten

Die Darstellung der Belastung bei symmetrischer und bei einseitiger Einspannung liegt nahe, nach Bild 5 die mechanischen bzw. kinematischen Prozesse genauer zu betrachten. Es ist vorab versucht, die Art der Biegung und die Reaktion in den „Lagerstellen" bildlich darzustellen.
Im ersten Schritt möge die wirksame Spannung geprüft werden. Das Drahtstück der Länge l sei eine Streckenlast. Die Beschleunigung b betrage

$$b = (1 \cdots 5)\ g = (1 \cdots 5)\ 981\ \text{cm s}^{-2}.$$

Die Masse des Drahtstücks von 2,5 mm² Querschnitt und 7,5 cm Länge bei 2,7 g cm^{-3} Dichte für Al und 8,9 g cm^{-3} Dichte für die 50 µm Cu-Auflage beträgt 0,689 g.
Somit gilt für die Gesamtkraft $F = m \cdot b$

$$\begin{aligned} F &= (1 \cdots 5)\ 0{,}689 \cdot 981\ \text{c g s} \\ &= (1 \cdots 5)\ 675\ \text{c g s} \\ &= (0{,}68 \cdots 3{,}4)\ 10^{-2}\ \text{N (wegen } 10^5\ \text{c g s} = 1\ \text{N}). \end{aligned}$$

Der beiderseitige befestigte Draht ist der Normalfall.
Das maximale Biegemoment ist nach *Dubbel* [6] bekanntlich in der Mitte der Probe.

$$M_c = \frac{F\,l}{24} = (2{,}22 \cdots 11{,}1) \cdot 10^{-3}\ \text{N cm}$$

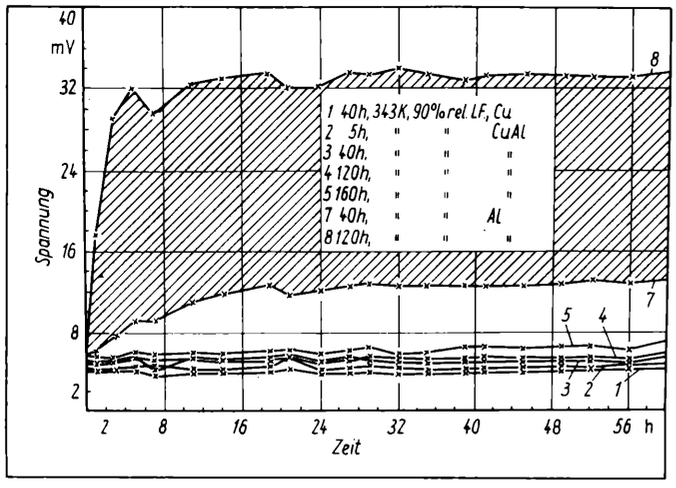


Bild 3. Abhängigkeit des Spannungsabfalls zwischen Leiter und Klemme von der Belastungszeit bei einer Beschleunigung von 2 g (zweiseitige Einspannung)

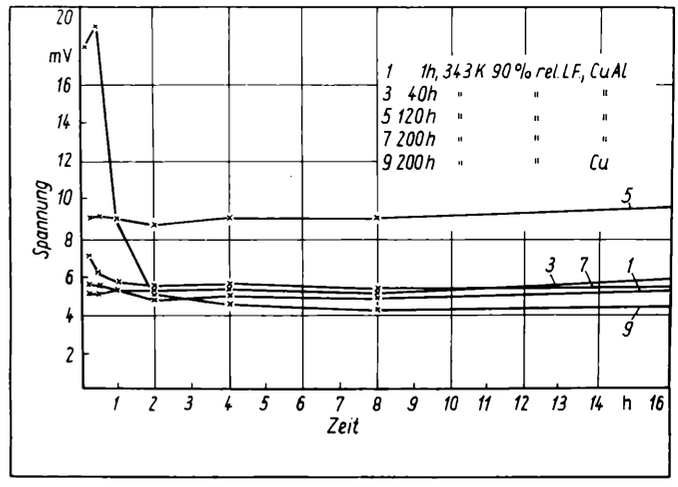


Bild 4. Abhängigkeit des Spannungsabfalls zwischen Leiter und Klemme von der Belastungszeit bei einer Beschleunigung von 5 g (zweiseitige Einspannung)

und an der Einspannstelle

$$M_{A,B} = -\frac{F\,l}{12} = (4{,}44 \cdots 22{,}2) \cdot 10^{-3}\ \mathrm{N\,cm}\,.$$

Für den statischen Fall gilt bekanntlich

$$\text{Stelle C: } \sigma_b = \frac{M\,b}{W\,b} = \frac{M\,b \cdot 10}{d^3} = \frac{(2{,}22 \cdots 11{,}1) \cdot 10^{-2}}{5{,}64 \cdot 10^{-3}}$$

$$= \underline{(3{,}96 \cdots 19{,}8)\ \mathrm{N\,cm^{-2}}}$$

$$\text{Stelle A, B:} \qquad = \underline{(7{,}92 \cdots 39{,}6)\ \mathrm{N\,cm^{-2}}}.$$

Nun darf ein Vergleich mit den Festigkeitseigenschaften geführt werden. Bei der Prüftemperatur von 343 K dürfte die Festigkeit des AlCu bei etwa (300 · · · 600) N cm^{-2} zu suchen sein. Dies ist relativ niedrig angesetzt. Die Dauerfestigkeit beträgt dann mindestens

$\sigma_{zd} = (50 \cdots 100)\ \mathrm{N\,cm^{-2}}$.

Die Einleitung von Versetzungsbewegungen ist der Größe σ_{zd} fast identisch, d. h.

$\sigma_{b\,\max,\,\mathrm{Exp}} < \sigma_{\mathrm{vers}}$.

Das Ergebnis besagt, daß trotz hoher Belastung beim Schwingtischversuch im Normalfall bis 5 g Kriechvorgänge ohne zusätzliche Einflüsse kaum möglich sind. Die Kriechgrenze des Werkstoffs ist erheblich höher als die nachweisbare Spannung im Experiment. Bei einseitiger Einspannung sind Kriechprozesse nicht auszuschließen. Mit den Regeln der Kinematik kann die Relativbewegung des Drahtes auch als schwingende Saite betrachtet werden. Interessant sind hierbei kritische Schwingfrequenzen. Nach *Holzweißig* und *Dreßig* [7] ist die 1. Resonanzfrequenz

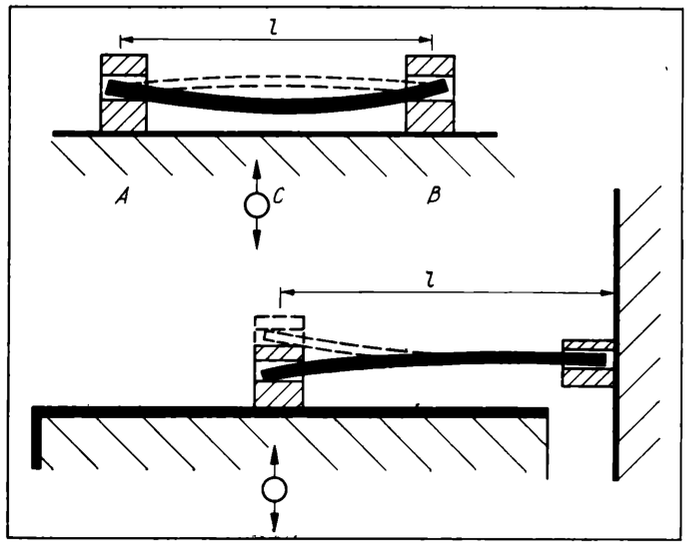
$$\omega_1 = \frac{22{,}4}{l^2}\sqrt{\frac{E}{\varrho}\,\frac{4}{\pi}\,\frac{A}{16}}\,.$$

Hierbei ist E der E-Modul und ϱ die Dichte sowie A die Querschnittsfläche der Saite. Man erhält

$$\omega_1 = 3{,}03 \cdot 10^3;\ \nu_1 = \frac{\omega}{2\,\pi} = 480\ \mathrm{Hz}\,.$$

Die Prüfbedingungen führen also nicht zur Erregung kritischer Resonanzfrequenzen. Allerdings sollte eine Einspannlänge von 20 cm zur Übereinstimmung von Arbeits- und Resonanzfrequenz führen.

Bild 5. Schwingtisch-Aufbauten für zwei Belastungsfälle



5. Schlußfolgerungen für die Praxis

Die Ergebnisse der Experimente erlauben es, im Hinblick auf die Brauchbarkeit des AlCu-Drahtes im Fall der dynamischen Belastung folgende Thesen aufzustellen.

1. Die Beurteilung dynamisch belasteter, fester elektrischer Verbindungen sollte in Analogie zu den statisch belasteten erfolgen. Die Rechenregeln der Mechanik bzw. Kinematik sind anzuwenden.
2. AlCu-Drähte verhalten sich in festen elektrischen Verbindungen im Hinblick auf ΔU wie Kupfer und im Hinblick auf die dynamische Belastung wie ein (rohr)verstärktes Aluminium. Im Vergleich zu Cu ist die mechanische Belastung reduziert.
3. Fälle der symmetrischen (zweiseitigen) Einspannung können dynamisch bis 2 g und kurzzeitig auch bis 5 g belastet werden. AlCu-Drähte halten in festen elektrischen Verbindungen solchen Ansprüchen stand.
4. Fälle der einseitigen Einspannung sollten dynamisch nicht belastet werden.
5. Mit Rücksicht auf mögliche Resonanzfrequenzen sollten die Einspannlängen l hinreichend kurz und den Arbeitsfrequenzen angepaßt sein.

Literatur

[1] Anwendungstechnische Information 1/81. 1. Überarbeitung und 2. Ergänzungsblätter, Kombinat VEB Kabelwerk Oberspree, HA AT

[2] *Richter, W.; Larisch, R.; Hänel, U.; Eilhauer, G.:* Das Verhalten fester elektrischer Klemmverbindungen in Stromkreisen, ELEKTRIE, Berlin 34 (1980) 7, S. 360–363

[3] *Seifert, L.:* Dynamische Belastung fester elektrischer Kontakte. Diplomarbeit TH Karl-Marx-Stadt, Sektion CWT, 1979

[4] *Menzel, F.:* Dynamische Beanspruchung fester Kontakte. Diplomarbeit, TH Karl-Marx-Stadt, Sektion CWT, 1981

[5] *Rauch, G.:* Das Verhalten fester elektrischer Verbindungen im Fall einseitig fixierter, dynamischer Belastung. Diplomarbeit TH Karl-Marx-Stadt, Sektion CWT 1983

[6] *Dubbel, H.:* Zahlentafeln und Formeln für den Maschinenbau. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag 1947

[7] *Holzweißig, F.; Dreßig, H.:* Lehrbuch der Maschinendynamik. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1978

EA 5357

Digitale Simulation von Prozeßgrößen der Elektroantriebstechnik auf dem Mikrorechnerentwicklungssystem MRES 20

R. Teßmer, KDT; S. Springer; Magdeburg

1. Einleitung

Die wachsenden Anforderungen an die Elektroantriebstechnik und Automatisierung erfordern es, Prozeßverläufe und Prozeßgrößen immer genauer zu untersuchen. Die digitale Simulation ist hierzu eine Methode.

In diesem Beitrag werden einige Ergebnisse erläutert, die sich bei der Untersuchung von Prozessen der Elektroantriebstechnik auf einem Mikrorechnerentwicklungssystem ergeben haben. Es wurde eine umfangreiche Bibliothek und ein Digitales Simulationssystem DSAM 1520 (**D**igitales **S**imulationssystem für die **A**ntriebstechnik auf dem **M**ikrorechner K **1520**) erarbeitet.

Mikrorechnerentwicklungssysteme bieten auf Grund ihrer ausgebauten Peripherie gute Voraussetzungen für einen solchen Einsatz. Mit Rücksicht auf die Verfügbarkeit für den Nutzer wurde auf zahlreiche interessante theoretische Untersuchungen verzichtet, wie sie sich gerade beim Mikrorechner für die digitale Simulation durch Mehrprozessorsysteme anbieten [1] [2].

2. Beschreibung des Systems

Um ein möglichst anwenderfreundliches Arbeiten zu gewährleisten, wurde lediglich der Speicherbereich des MRES 20 (A4-Muster) von 16 K-Byte RAM auf 32 K-Byte RAM erweitert. Die hierzu benötigte Leiterkarte vom Typ OPS K 3525 kann von der Stromversorgung des Entwicklungssystems mit versorgt werden.

Das entwickelte Programmsystem DS 1520, dessen Komponenten in Tafel 1 zusammengestellt sind, führt den Nutzer über Bildschirmdialog bei der Lösung der Simulationsaufgabe. Durch die Nutzung von Komponenten des Betriebssystems MEOS 1521 kann ein servicefreundliches Arbeiten bei vertretbarem Programmieraufwand gewährleistet werden. Das Programm, das sich aus dem Blockschaltbild des zu untersuchenden Regelkreises leicht ableiten läßt, wird in einer gleichungsorientierten Anwendersprache notiert. Im Bild 1 ist zur Veranschaulichung der Modellbeschreibung ein sehr einfacher Regelkreis mit dem dazugehörigen DSAM-Programm dargestellt. Der im DS 1520 enthaltene Translator übersetzt dieses Programm in die Makroassemblersprache MAPS K 1520. Die nun folgenden Assembler- und Binderläufe übernimmt die automatische Fileerstellung des Systems, so daß der Nutzer sehr einfach zum Maschinenprogramm geführt wird und sich seine Kenntnisse in der Regel auf die Bedienung des MRES beschränken können.

Ein einmal erstelltes Maschinenprogramm kann jederzeit wieder zur Simulation genutzt werden, da es auf dem externen Speicher abgelegt wird. Über Bildschirmdialog ist eine Korrektur der eingestellten Werte für Simulations- und Modellparameter möglich. Strukturumschaltungen und die Möglichkeit programmierbarer Zeitstops zur Berechnung eines Modells in Zeitintervallen gestatten ein für diesen Rechnertyp servicefreundliches Arbeiten. Die Ausgabe der Simulationsergebnisse kann entweder im Tabellendruck oder als Pseudografik geschehen. Bei der Pseudografik sind bezüglich der Achsenormierung und der Variablenauswahl mehrere Varianten möglich, außerdem gestattet das System die Darstellung von Phasendiagrammen oder beliebig wählbarer Abhängigkeiten, z. B. Drehzahl-Drehmomenten-Kennlinien. Da die Druckausgabe erst nach dem beendeten Rechenlauf erfolgt, kann der Nutzer mit den berechneten Werten verschiedene Ausgabevarianten anfordern und daraus eine geeignete auswählen [4].

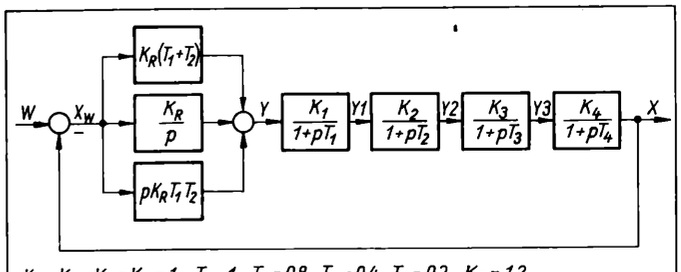
Tafel 1. Programmkomponenten des Systems DS 1520

Name des Programms	Funktion im System DS 1520
Translator TA	Übersetzung des Anwenderprogramms in die Assemblersprache MAPS K 1520.
Listendruck LD	Erstellung einer Druckliste des Anwenderprogramms im freien Format auf dem Seriendrucker.
Tabellendruck TD	Ausgabe der Simulationsergebnisse als Druckwerttabelle auf dem Seriendrucker.
Arithmetik AR	Grundrechenarten im internen 3-Byte-Gleitkommaformat.
Konvertierung PK	Syntaxprüfung von Zahleneingaben und E/A-Konvertierung.
Parameterarbeit PA	Eingabe und Anzeige von Simulations- und Modellparametern über die Bildschirmeinheit.
Funktionen FU	Ausgewählte Standardfunktionen im 3-Byte-Gleitkommaformat.
Druckausgaben DK	Ausgabe von Parametern, diversen Pseudografiken und Phasendiagrammen auf dem Seriendrucker.
Steuerprogramm DS	Organisation der Bildschirmdialogarbeit bei der Programmerstellung, Übersetzung und Simulation. Aktivierung der anderen Systemkomponenten über Kommandowörter.

3. Leistungsumfang und Genauigkeit

DSAM 1520 ist für kleine bis mittlere Systeme konzipiert worden. Es soll weder den Analogrechner noch einen Großrechner ersetzen, sondern den in der Praxis tätigen Ingenieur bei der Untersuchung abgegrenzter Teilaufgaben unterstützen. Aus diesem Grund wurden bezüglich der Genauigkeit des Systems Abstriche gemacht, um mit dem zur Verfügung stehenden Speicherplatzbedarf und der benötigten Rechenzeit noch in vernüftigen Grenzen zu bleiben. Die interne Zahlendarstellung ist ein 3-Byte-Gleitkommaformat. Der darstellbare Zahlenbereich von $-10^{18} \cdots 10^{18}$ wird für technische Prozesse als ausreichend eingeschätzt. Mit diesem Zahlenformat lassen sich Zahlen mit einem maximalen relativen Fehler von 10^{-5} bis 10^{-4} darstellen bzw. Operationen ausführen. Wegen der Vielzahl der auszuführenden Grundoperationen in einem Simulationssystem wurde auf die Anwendung der Gleitkommaarithmetik, die vom VEB Robotron angeboten wird, verzichtet, da diese als BCD-Arithmetik aufgebaut ist und ein Vielfaches an Rechenzeit gegenüber einer dualen Gleitkommaarithmetik benötigt. Hierbei brauchen die E/A-Konvertierungen mehr Rechenzeit und sind auch

Bild 1. Programmierungsbeispiel zur Ermittlung der Sprungantwort [3]




```
K1=K2=K3=K4=1  T1=1  T2=0,8  T3=0,4  T4=0,2  KR=1,2
   PN     SP
;Beispiel zur Programmnotierung im System DSAM 1520
# Parameter                    # Druck
T1 = 1                         XW, Y, X
T2 = 0,8
T3 = 0,4
T4 = 0,2
K3 = 0,83333                   # HA
W  = 1                         END

# Struktur
XW = SUM(W, -X)
Y  = PID(XW, T1, T2, K3)
Y1 = VZ1(Y, T1)
Y2 = VZ1(Y1, T2)
Y3 = VZ1(Y2, T3)
Y4 = VZ1(Y3, T4)
```

Professor Dr. sc. techn. *Richard Teßmer* ist Direktor der Sektion Technische Kybernetik und Elektrotechnik an der Technischen Hochschule Magdeburg; Dr.-Ing. *Sylvia Springer* ist wissenschaftliche Assistentin an der gleichen Einrichtung.

komplizierter, jedoch stehen in einem Simulationssystem einer Vielzahl von internen Operationen nur einige wenige Konvertierungen gegenüber.
Wie das Bild 1 zeigt, wird das Simulationsprogramm aus den Regelkreisblöcken zusammengesetzt. Diese Blöcke sind als Makros definiert und in einer Bibliothek zusammengefaßt. Gegenwärtig sind 46 Blöcke für typische Anwendungen in der Elektroantriebstechnik programmiert und ausgetestet [5]. Der Nutzer hat jedoch die Möglichkeit, diesen Blockumfang leicht zu erweitern und eigene Makrobausteine zu definieren, falls er über Kenntnisse der Assemblersprache MAPS K 1520 verfügt. Der große Vorteil besteht darin, einmal getestete Strukturen mit geringen Änderungen auch auf Mikrorechnern K 1520 zu implementieren, die nicht mit der Peripherie des MRES ausgerüstet sind. Entsprechend den Möglichkeiten des K 1520 und dem gewählten Zahlenformat wurde für die numerische Integration die Trapezregel ausgewählt. Dieses einfache Verfahren, das jedoch relativ kleine Schrittweiten erfordert, zeichnet sich durch eine gute numerische Stabilität aus. In der Elektroantriebstechnik, wo bedingt durch Stromrichterstellglieder Sprünge von physikalischen Größen auftreten können, ergibt sich hier ein Vorteil gegenüber Integrationsverfahren höherer Ordnung. Die Notwendigkeit kleiner Schrittweiten wirkt sich auch bei Blöcken mit D-Anteil positiv aus, weil sich damit der Differenzenquotient, der in einem digitalen Simulationssystem gebildet werden muß, besser dem Differentialquotienten annähert.

4. Zusammenfassung

Erfahrungen bei der Arbeit mit dem System haben gezeigt, daß es für eine Vielzahl von Anwendungsgebieten, die weit über die Elektroantriebstechnik hinaus gehen, angewendet werden kann und ingenieurtechnisch hinreichend genau ist. Durch den flexiblen Blockvorrat lassen sich auch eine Gruppe von Modellen simulieren, deren Untersuchung am Analogrechner nicht möglich war.
Mit dem erarbeiteten Simulationssystem wird der als Entwicklungs- und Testrechner konzipierte Mikrorechnerentwicklungsplatz MRES 20 um einen Einsatzfall bereichert.

Literatur

[1] *Hecht, V.:* Überlegungen zur Simulation dynamischer Systeme auf Multiprozessor-Rechenanlagen. Diss. A, Stuttgart 1976
[2] *Angelé, G.; Dillmann, R.:* Ein interaktives Programmsystem zur blockorientierten digitalen Simulation dynamischer Prozesse auf der Basis eines Multiprozessorsystems. Elektronische Rechenanlagen 23 (1981) 1, S. 12 – 19
[3] *Schillbach, R.; Pandit, M.; Weber, W.:* Prozeduren zur Realisierung linearer DDC-Algorithmen. Regelungstechnik 16 (1968) 8. S. 337 – 344
[4] *Springer, S.:* Entwicklung eines digitalen Simulationssystems für den Mikrorechner K 1520. Forschungsbericht 1982, TH Magdeburg, S. 9
[5] *Hildebrandt, H.; Reimann, W.:* Programmdokumentation SPAS Anwendungsbeschreibung. Institut für Regelungstechnik Berlin, 1980

EA 5252

Wir empfehlen aus dem Angebot des VEB Verlag Technik

Statistik für Elektrotechniker

Eine Darstellung an Beispielen aus der Hochspannungstechnik

Von *W. Hauschild; W. Mosch.* Berlin: VEB Verlag Technik 1984. 1. Auflage. 268 Seiten, 185 Bilder, 56 Tafeln. Leinen 28,— Mark. Bestell-Nr. 553208 6

Das Buch verknüpft die Methoden der mathematischen Statistik zur Planung und Auswertung von Experimenten mit den fachspezifischen Problemen der energetischen Elektrotechnik, insbesondere der Hochspannungstechnik. Die mathematischen Grundlagen werden ohne Ableitungen und Beweise in logischer Folge dargestellt und an zahlreichen Beispielen erläutert.

Prof. Dr.-Ing. *Hermann Kärner*, Institut für Hochspannungstechnik, Technische Universität Braunschweig:

„Ich habe das Buch intensiv angesehen und möchte dem Verlag und den Autoren zu der hervorragenden Darstellung gratulieren. Das Buch bietet inhaltlich einen sehr guten Überblick über statistische Verfahren und ist, wie sein Titel ja auch sagt, wegen seines Anwendungsbezugs auf elektrotechnische Probleme insbesondere für den in der Elektrotechnik Tätigen, wegen seines universellen Charakters aber doch auch für andere Ingenieure von hervorragendem Wert. Das umfangreiche Literaturverzeichnis zeigt, daß die vorhandene, zum Themenkreis gehörende Literatur umfassend bearbeitet worden ist".

Die Redaktion

Betrachtungen zum Einsatz neuartiger Wandler

J. Ermisch, KDT, Radebeul

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *Werner Brendler* zum 60. Geburtstag gewidmet[1])

Die Verwendung von speziell dimensionierten Einphasenstromtransformatoren als Meßübertrager ist seit etwa 100 Jahren bekannt. Diese Wandler sind seither unentbehrliche Geräte im System der Meßwerterfassung, Meßwertübertragung und Meßwertverarbeitung im Elektroenergiesystem. Durch entsprechende Dimensionierung des Magnetkernes und der Wicklungen lassen sich praktisch alle technischen Forderungen hinsichtlich Genauigkeit, Kurzschluß- und Spannungsfestigkeit, Nennleistung und Aussteuerbarkeit befriedigen. In Verbindung mit Meßwertverarbeitungseinrichtungen auf elektromechanischer Basis liefern „Meßtransformatoren" neben der Information „Meßwert" (Strom/Spannung) zusätzlich die Energie für die Betätigungsorgane der angeschlossenen Instrumente, Relais oder Schalter. Durch den relativ einfachen Aufbau und die über Jahrzehnte ausgereifte Konstruktion sind diese Geräte zuverlässig und wartungsarm.
Durch die Trennung der Funktionen „Übertragung des Meßwertes" und „Bereitstellung des Leistungsbedarfs für die angeschlossenen meßwertverarbeitenden Geräte" wurden einige neue Lösungen praktikabel, die unter Nutzung physikalischer Effekte [1] [2] oder elektronischer Meßwertübertragungsstrecken [3] [4] den Aufbau neuartiger Meßwandler gestatten, die sogenannten nichtkonventionellen Meßwandler.

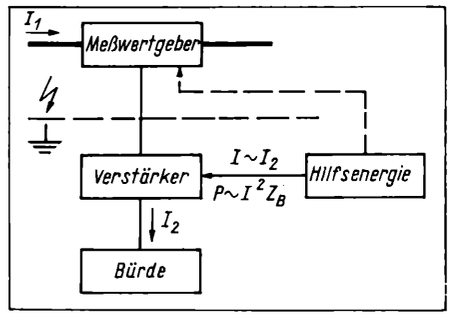


Bild 1
Leistungsbilanz beim nichtkonventionellen Meßwandler

1. Nichtkonventionelle Meßwandler

Ein nichtkonventioneller Meßwandler (Bild 1) ist funktionell an das Vorhandensein einer Hilfsenergiequelle gebunden. Der Meßwert wird mit einem entsprechenden Meßwertaufnehmer erfaßt und leistungsarm bzw. leistungslos auf Erdpotential übertragen. Sogenannte „aktive Wandler" benötigen hierzu bereits schon Hilfsenergie, die entweder aus dem Meßkreis oder über eine z. B. transformatorische Übertragung von einer Quelle auf Erdpotential bereitgestellt werden muß. Passive Wandler (ohne Hilfsenergiebereitstellung auf Potential) hingegen nutzen als Meßwertaufnehmer beispielsweise induktive Geber, wie Rogowski-Spulen [5] oder kapazitive Teiler [6]. Der Übertragungsstrecke ist eine Baugruppe zur Aufbereitung des Meßwertes, im einfachsten Fall ein elektronischer Verstärker, zugeordnet. An diese Baugruppe ist dann der Verbraucher (Bürde) angeschlossen. Die Hilfsenergiequelle muß so bemessen sein, alle betriebsmäßig vorkommenden Zustände speisen zu können, d. h. einer Bürde, die im Nennbetrieb eine Scheinleistung S_N benötigt, im Überstromfall die n^2-fache Leistung zuzuführen. Nach hergebrachter Schaltungsphilosophie („Wandler ist gleich Leistungsquelle") müßten bei Nennleistungen im VA-

Dr.-Ing. *Jochen Ermisch* ist wissenschaftlicher Oberassistent an der Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden.

[1]) Mit diesem Beitrag möchte der Autor seinem hochverehrten Hochschullehrer, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *Werner Brendler*, der am 23. 06. 1984 seinem 60. Geburtstag begeht, seinen Dank und seine Hochachtung zum Ausdruck bringen und ihm noch weitere erfolgreiche Jahre in Lehre, Erziehung und Forschung bei bester Gesundheit wünschen.

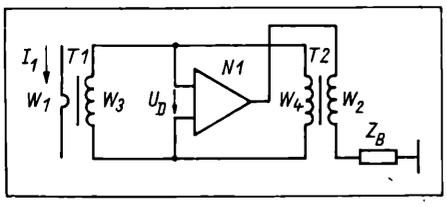


Bild 2
Prinzip eines Brückenwandlers

Bereich und hohen Werten des Nennaussteuerungsgrenzfaktors von der Hilfsenergiequelle Leistungen im kW-Bereich bereitgestellt und vom Verstärker verarbeitet werden. Die Kosten für die Hilfsenergiequelle und den Meßverstärker würden die Vorteile die eine leistungsarme Meßwertübertragung mit sich bringt, völlig in den Hintergrund rücken und einen Einsatz nichtkonventioneller Wandler unmöglich machen.

Moderne Konzepte zur Meßwertverarbeitung auf elektronischer Basis haben einen kleinen Meßleistungsbedarf und benötigen die vom Wandler angebotene Leistung nicht. Die Stromwandler sind in diesem Falle mit Shunts beschaltet, die den Strom in eine proportionale Spannung umformen. Der eigentliche Meßleistungsbedarf der elektronischen Meßwertverarbeitungseinrichtung liegt im Bereich einiger mW auch bei hohen Aussteuerungen. Derartig kleine Leistungen können aber problemlos von einer dem nichtkonventionellen Wandler zugeordneten Quelle bereitgestellt werden, die dann insgesamt zur Deckung des gesamten Leistungsbedarfes von Wandler und Bürde nur noch eine Leistung im Bereich einiger Watt zur Verfügung stellen muß. Als Verstärker können billige integrierte Kleinleistungsverstärker aus dem verfügbaren Sortiment (z. B. A 2030) Verwendung finden [7].

Kommen weiterhin nichtkonventionelle Wandler zum Einsatz, die sowohl für den Meßwertaufnehmer, die Potentialtrennung und für die elektronischen Baugruppen ein Minimum an Aufwand erfordern, dann können unter dem Aspekt einer leistungsarmen Meßwertverarbeitung derartige Wandler ökonomisch in allen Spannungsebenen Einsatz finden. Als Beispiel für einen derartigen Wandler sei der Brückenwandler [8] [9] genannt (Bild 2). Der Wandler besteht aus zwei Übertragern $T1$ und $T2$ mit gleichem oder annähernd gleichem Übertragungsverhalten, wobei $T1$ die Potentialtrennung gewährleistet. Die Wicklungen W_3 und W_4 der Übertrager $T1$ und $T2$ sind verbunden. Die Spannung U_D am Eingang des Operationsverstärkers ist dann Null, wenn die Wicklung W_2 des Übertragers $T2$ von einem Strom I_2 durchflossen wird, der dem Strom I_1 in der Wicklung W_1 des Übertragers $T1$ entspricht. Das Übersetzungsverhältnis wird durch die Beziehung

$$\frac{I_1 W_1}{l_{k1}} = \frac{I_2 W_2}{l_{k2}} \qquad (1)$$

l_k Kernweglänge

festgelegt.

2. Ausführungsbeispiele

In einer Versuchsschaltung wurde ein Einleiterstromwandler für einen Nennstrom $I_{1N} = 5$ A als Brückenwandler entsprechend Schaltung Bild 4 aufgebaut. Als Verstärker fand ein für die Unterhaltungselektronik als Endstufe vorgesehener Schaltkreis A 2030 Anwendung, der mit nur wenigen Bauelementen außen beschaltet einen äußerst geringen Aufwand erfordert. Die beiden Übertrager $T1$ und $T2$ sind extrem kleine Ringkerne gleichen Typs mit $l_k = 7{,}07$ cm und $A_k = 0{,}1125$ cm² mit einer Masse von lediglich je 6,84 g Kernwerkstoff aus Muniperm. Die Wicklungen $W_3 = W_4 = 100$ Wdg aus Draht mit einem Durchmesser 0,3 mm. Die Windungszahl W_2 beträgt 5.

Belastet wurde der Wandler mit einer Gesamtbürdenleistung von $S_{2B} = 6$ VA. Bild 3 zeigt die gemessenen Betragsfehler F_i in % und Winkelfehler γ_i in Winkelminuten. Der Wandler genügt den Anforderungen der Genauigkeitsklasse 0,2. Ein Einleiterstromwandler in konventioneller Bauweise für die gleichen technischen Daten würde ein Gewicht von mehr als 10 kg aufweisen. Auf Grund seiner Fehlerarmut kann der Brückenwandler außer in Systemen der Elektroenergieversorgung eine breite Anwendung in der Labormeßtechnik finden. Bild 4 zeigt eine Variante zur genauen Strommessung mittels digitalem Schalttafelinstrument [10].

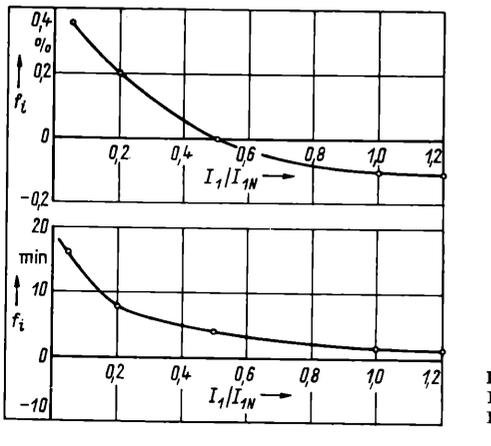


Bild 3
Fehlerkurven eines Brückenwandlers

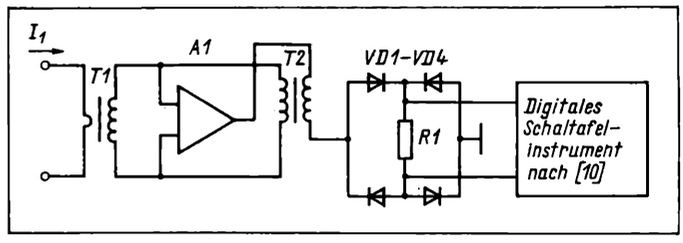


Bild 4. Strommessung mit einem digitalen Schaltafelinstrument

3. Quasianaloge Anzeige für Strom, Spannung und Leistungsfaktor

Eine genaue meßtechnische Erfassung des Stromes oder der Spannung erweist sich oft als unnötig. Meist genügt eine grobe Orientierung, vor allem dann, wenn wie in Schaltanlagen eine Vielzahl von Informationen erfaßt werden muß. Sehr anschaulich lassen sich Meßwerte mit Hilfe von Leuchtbändern quasianalog darstellen. Zum Aufbau derartiger Anzeigeinstrumente steht der Schaltkreis A 227 D zur Verfügung. Von Nachteil ist, daß für die Anzeige eine Hilfsenergiequelle erforderlich ist. Problematisch ist weiterhin, daß entweder

- der Meßwert über Wandler potentialgetrennt zugeführt werden muß oder
- für jede Anzeige ein Netzteil mit Potentialtrennung zur Verfügung stehen muß.

Für Meßwertverarbeitungsglieder kleiner oder mittlerer Genauigkeit wäre der Einsatz von genauen Meßwandlern, wie z. B. dem Brückenwandler, sinnlos.

Sehr gut eignet sich der sogenannte Dreiwicklungswandler [11] zur Meßwerterfassung in Niederspannungssystemen. Bild 5 zeigt die Schaltung eines quasianalogen Anzeigeinstruments mit einem Dreiwicklungswandler. Der Wandler $T1$ ist als Einleiterwandler für $I_{1N} = 10$ A ausgelegt (Kern R 3 A, Mu 80, $W_1 = 1$, $W_2 = 100$ Wdg 0,7 Cu L, $W_3 = 100$ Wdg 0,16 Cu L). Die Wicklung W_3 ist an den Eingang eines Präzisionsgleichrichters [12] angeschlossen, der aus den Elementen *A1*, *VD 14/15*, *R1* bis *R10* und *C1* bis *C3* besteht. Am Ausgang des Gleichrichters ist der Ansteuerschaltkreis A 277 D für die Bandanzeige angeschaltet. Die gewählte Dimensionierung gestattet eine Anzeige bis 12 A (1 A pro LED) und kann nach oben hin durch

- Kaskadierung mehrerer A 277 D
- Dimensionierungsänderung (*R10*, *R12*) mit gröberer Anzeige und nach unten hin durch
- Vergrößerung der AW-Zahl von $T1$ oder
- Dimensionierungsänderung (*R10*, *R12*) bei verminderter Genauigkeit

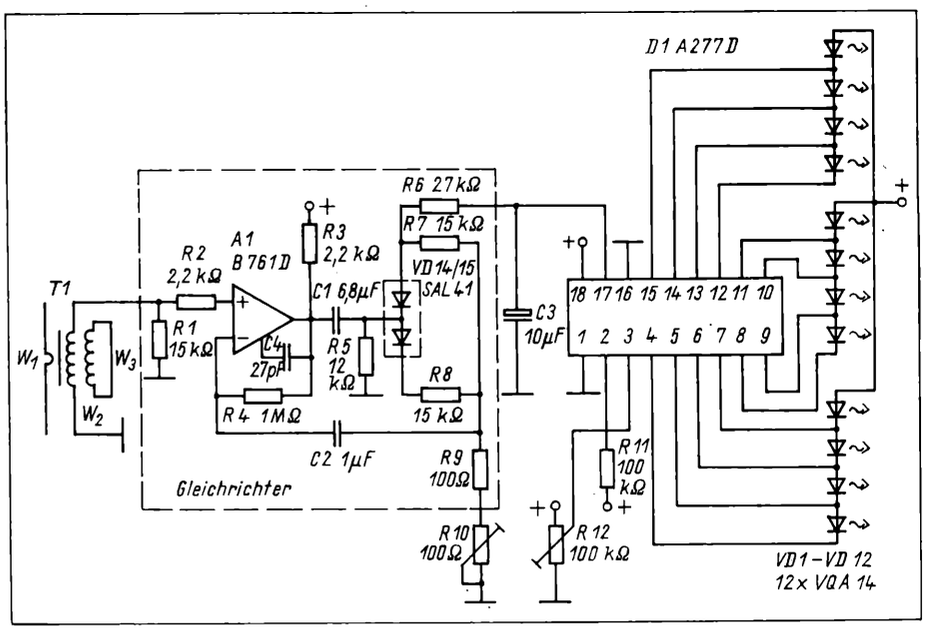
verändert werden.

Die Schaltung zur Anzeige von Spannungen ist entsprechend. Die Eigenschaft des Schaltkreises A 277 D, den Quotienten aus Steuerspannung und Referenzspannung gemäß der Beziehung

$$L = INT\left(13\,\frac{U_{st} - U_{Ref\,min}}{U_{Ref\,max} - U_{Ref\,min}}\right) \qquad (2)$$

zu bilden [13], gestattet den Aufbau von Anzeigeinstrumenten für den Leistungsfaktor cos φ [14]. Für den Fall $U_{Ref\,min} = 0$, Ableitung der Steuerspannung U_{st} aus der Wirkkomponente des Meßwertes und Ableitung der Referenzspannung $R_{Ref\,max}$ aus der Scheinkomponente des Meßwertes ergibt sich nach Gleichung (2), daß die Länge des Leuchtbandes oder die Lage des Leuchtpunktes L

Bild 5. Quasianaloge Strommeßeinrichtung



proportional dem Leistungsfaktor ist. Das Prinzip der Schaltung ist in Bild 6 dargestellt. Das Ausgangssignal des Stromwandlers (z. B. Dreiwicklungswandler) wird einem Begrenzer *D1* zugeführt. Die Ausgangsgröße des Spannungswandlers wird sowohl einem phasenempfindlichen Gleichrichter *A1* zur Ableitung der Wirkkomponente als auch einem nicht phasenempfindlichen Gleichrichter *A2* zur Ableitung der Scheinkomponente zugeführt. Der phasenempfindliche Gleichrichter wird von Ausgangssignal des Begrenzers gesteuert. Die Ausgangsspannungen der Gleichrichter werden über Tiefpässe dem Ansteuerschaltkreis A 277 D zugeführt.

Ein Ausschnitt aus der schaltungstechnischen Realisierung ist im Bild 7 dargestellt. Als nichtphasenempfindlicher Gleichrichter findet die gleiche Schaltung wie in Bild 5 Verwendung. Einen phasenempfindlichen Gleichrichter erhält man, indem die Dioden

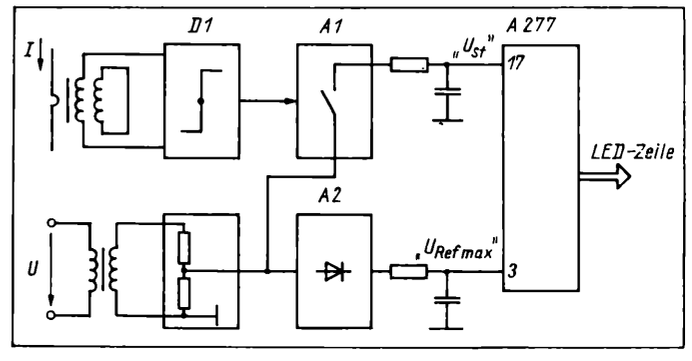


Bild 6. Prinzip der Leistungsfaktormessung

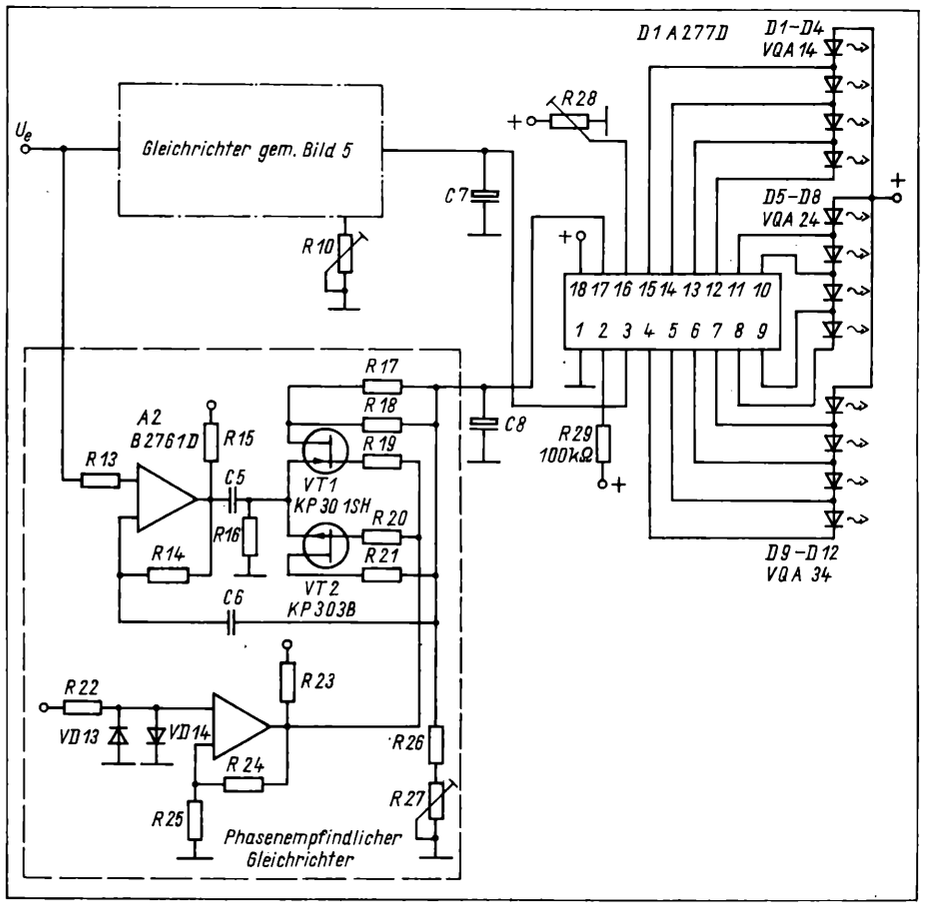


Bild 7. Schaltungsausschnitt für eine quasianaloge Anzeige des Leistungsfaktors

VD 14/14 durch Feldeffekttransistoren *VT1/VT2* oder durch eine CMOS-Schaltung ($^1/_3$ CD 4007 B) ersetzt werden, die von einem als Komparator geschaltenen Operationsverstärker gesteuert wird.

Der Abgleich der Schaltung erfolgt in zwei Schritten:

a) Bei einer Phasenverschiebung $\varphi = 0$ werden die Ausgangsspannungen der beiden Gleichrichter auf gleichen Wert eingestellt (beispielsweise 1 V).

b) Mit der Referenzspannung $U_{Ref\,min}$ an Pin 16 der IS A 277 wird der Anzeigebereich festgelegt. Wird die Referenzspannung so gewählt, daß bei $\varphi = 60°$ die zweite Diode leuchtet, so erhält man eine Anzeige im Bereich von $0{,}45 \leqq \cos\varphi \leqq 1{,}0$ in der Stufung 0,05 je LED.

Die Eingangsspannungen der Gleichrichter sollten zweckmäßigerweise einem Spannungswandler entnommen werden, da dann der Schaltkreis mit Normalfall mit einer konstanten Spannung $U_{Ref\,max}$ betrieben wird. Die Größe des Stromwertes hat auf die Anzeigegenauigkeit keinen Einfluß, da nur die Polarität ausgewertet wird.

4. Zusammenfassung

Die angeführten Beispiele sollten zeigen, daß es mit einfachen Mitteln möglich ist, mit modernen Bauelementen relativ einfach hinreichend genaue Geräte zur Meßwertverarbeitung zu realisieren. Der geringe Leistungsbedarf dieser Geräte gestattet generell den Einsatz neuartiger Wandler, wobei entweder genaue nichtkonventionelle Wandler oder speziell dimensionierte konventionelle Wandler Verwendung finden.

In den nächsten Jahren werden verstärkt Systeme zur Meßwertverarbeitung auf der Basis von Mikrorechnern zum Einsatz kommen. Als Meßwertgeber bieten sich auf Grund ihrer Eigenschaften spezielle nichtkonventionelle Wandler an, deren Ausgangsparameter auf die dem Rechner vorgeschalteten Umsetzer abgestimmt sind. Die Möglichkeit, nichtkonventionelle Stromwandler mit einer kleinen AW-Zahl und Spannungswandler in Form von hochohmigen Teilern auszuführen gestattet, auch in bestehenden Anlagen Meßwerte praktisch ohne Änderung der Bebürdung der in der Anlage vorhandenen Wandler zusätzlich zu erfassen und zu verarbeiten.

Literatur

[1] *Bastian, P.:* Der Faraday-Effekt – Ein neues Stromwandlerprinzip. ELEKTRIE Berlin 28 (1974) 5, S. 258

[2] *Ermisch, J.; Kunckel, K.-H.:* Mehrkanaliger lichtoptischer Stromwandler mit externer Lichtmodulation für die Übertragung von Meßwerten über große Potentialunterschiede. Wiss. Z. Techn. Univers. Dresden 28 (1979) 3, S. 553 bis 559

[3] *Ermisch, J.:* Einsatz optischer Übertragungsstrecken in der energetischen Elektrotechnik und in der Hochspannungstechnik. msr. Berlin 22 (1979) 9, S. 499–502

[4] *Milde, M.:* Ausnutzung verschiedener Arten der Trägerfrequenzmodulation zur Strommessung in Hochspannungsnetzen. ELEKTRIE, Berlin 32 (1978) 6, S. 330–331

[5] *Ermisch, J.; Kunckel, K.-H.:* Schaltungsanordnung zur Strommessung mittels magnetischen Spannungsmessers WP G01R/202867

[6] *Brendler, W.; Ermisch, J.; Hoppadietz, F.; Weser, K.-H.:* Hochspannungsmeßeinrichtung mit einem kapazitiven Teiler. WP G01R/325 944/0

[7] *Brendler, W.; Ermisch, J.:* Elektronische Verstärker in neuartigen Stromwandlern für das Elektroenergiesystem. Wiss. Z. Techn. Univers. Dresden 30 (1981) 2/3, S. 309–315

[8] *Brendler, W.; Ermisch, J.:* Meßanordnung für elektrische Ströme. EP G01R 17/01 0029903

[9] *Brendler, W.:* Prinzip, Eigenschaften und Anwendungsmöglichkeiten des „Brückenwandlers". Tagungsmaterial zur 9. Wissenschaftlichen Konferenz der Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden vom 8. bis 10. 12. 1981, Themengruppe B2, S. 113–119

[10] *Ermisch, J.:* Digitales Schalttafelinstrument, radio fernsehen elektronik, Berlin 32 (1983) 11, S. 672–674

[11] *Brendler, W.; Kunckel, K.-H.:* Dreiwicklungs-Strom-Spannungswandler. ELEKTRIE, Berlin 26 (1972) 6, S. 170–173

[12] *Kühne, H.:* AC-DC-Umsetzer mit guten Frequenzeigenschaften. radio fernsehen elektronik, Berlin 28 (1979) 4, S. 261–263

[13] LED Ansteuerschaltkreis A 277 D – Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten. Schriftenreihe Mikroelektronik, Heft 10, VEB Halbleiterwerk Frankfurt/Oder

[14] *Brendler, W.; Ermisch, J.:* Schaltungsanordnung zur Bestimmung und Auswertung des Leistungsfaktors. WP G01R/253 814,6

EA 5432

Die Ummagnetisierungsverluste geometrisch verkleinerter Modellanordnungen

H. Metzner, KDT, Reichenbach; D. Roseburg, KDT, Dresden

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *Werner Brendler* zum 60. Geburtstag gewidmet[1]).

Der anhaltende Trend zu immer größeren Einheitsleistungen von Generatoren und Transformatoren erfordert neue ingenieurmäßige Lösungen und Vorausberechnungen. Da prinzipielle Änderungen an gefertigten Großtransformatoren oder Generatoren nicht mehr möglich sind, ist der Entwickler dieser Großgeräte auf Voruntersuchungen an Modellanordnungen angewiesen.

Nachfolgend werden die Modellierung eines massiven Stahlrings und die dafür meßtechnisch sowie analytisch bestimmten Ummagnetisierungsverluste angegeben.

1. Hauptmodellbedingungen für physikalische Modelle elektrischer Maschinen mit ähnlichen elektromagnetischen Feldern [1]

Ausgangspunkt der Betrachtungen sind die Maxwellschen Gleichungen

$$\operatorname{rot}\vec{H} = \varkappa\,\vec{E} + \varepsilon\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \tag{1}$$

$$\operatorname{rot}\vec{E} = -\mu\frac{\partial\vec{H}}{\partial t}, \tag{2}$$

die sowohl im Original als auch im Modell die elektromagnetischen Zusammenhänge beschreiben.

Werden die Originalgrößen mit dem Index 0 und die Modellgrößen mit dem Index M gekennzeichnet, dann ergibt sich

$$\operatorname{rot}\vec{H}_0 = \varkappa_0\,\vec{E}_0 + \varepsilon_0\frac{\partial\vec{E}_0}{\partial t_0} \tag{3}$$

$$\operatorname{rot}\vec{E}_0 = -\mu_0\frac{\partial\vec{H}_0}{\partial t_0} \tag{4}$$

$$\operatorname{rot}\vec{H}_M = \varkappa_M\,\vec{E}_M + \varepsilon_M\frac{\partial\vec{E}_M}{\partial t_M} \tag{5}$$

$$\operatorname{rot}\vec{E}_M = -\mu_M\frac{\partial\vec{H}_M}{\partial t_M} \tag{6}$$

Das Verhältnis der Originalgrößen zu den Modellgrößen, d.h. der Modellierungsmaßstab soll mit m bezeichnet werden; z.B.:

$$m_\varkappa = \frac{\varkappa_0}{\varkappa_M};\; m_\mu = \frac{\mu_0}{\mu_M};\; m_l = \frac{l_0}{l_M}.$$

Wird nun dieser Modellierungsmaßstab in die Gleichungen der Originalgrößen eingeführt, so lauten diese:

$$\frac{m_H}{m_l}\operatorname{rot}\vec{H}_M = m_\varkappa\, m_H\,\varkappa_M\,\vec{E}_M + m_\varepsilon\frac{m_E}{m_t}\,\varepsilon_M\frac{\partial\vec{E}_M}{\partial t_M} \tag{7}$$

$$\frac{m_E}{m_l}\operatorname{rot}\vec{E}_M = -m_\mu\frac{m_H}{m_l}\,\mu_M\frac{\partial H_M}{\partial t_M}. \tag{8}$$

Aus dem Koeffizientenvergleich der Gln. (5) und (6) mit den Gln. (7) und (8) folgen die Hauptmodellbeziehungen in ausführlicher Form zu:

$$\frac{m_\varkappa\, m_E\, m_l}{m_H} = 1;\quad \frac{m_\varepsilon\, m_E\, m_l}{m_H\, m_l} = 1;\quad \frac{m_\mu\, m_H\, m_l}{m_E\, m_t} = 1. \tag{9) (10) (11}$$

Da es sich bei den zu modellierenden Anordnungen meist um Mehrstoffsysteme handelt, lassen sich die Modelle faktisch nur für $m_\varkappa = m_\varepsilon = m_\mu = 1$, d.h. aus gleichen Materialien wie das Original

Dr.-Ing. *Horst Metzner* ist Abteilungsleiter Entwicklung im VEB Transformatorenwerk Reichenbach. Dr. sc. techn. *Detlev Roseburg* ist Dozent für Transformatoren und Meßwandler der Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden.

[1]) Die Autoren möchten mit diesem Artikel ihren Dank und ihre Hochachtung für ihren langjährigen Lehrer und Leiter zum Ausdruck bringen und dem Jubilar noch weitere erfolgreiche Jahre in Lehre, Erziehung und Forschung wünschen.

fertigen. Damit vereinfachen sich die Modellierungsbeziehungen zu

$$\frac{m_E\, m_l}{m_H} = 1;\quad \frac{m_E\, m_l}{m_H\, m_t} = 1;\quad \frac{m_H\, m_l}{m_E\, m_t} = 1. \qquad (12)\ (13)\ (14)$$

Nach Elimination des allen drei Gleichungen gemeinsamen Faktors m_E/m_H ergeben sich endgültig zwei Hauptmodellbeziehungen:

$$\frac{m_l^2}{m_t} = 1 \qquad (15)$$

Hauptmodellbeziehung unter Berücksichtigung des elektrischen Strömungsfeldes und der Wärmeleitvorgänge

$$\frac{m_l}{m_t} = 1 \qquad (16)$$

Hauptmodellbeziehung unter Berücksichtigung des dielektrischen Verschiebungsfeldes und des Wärmeüberganges.

Aus den Gln. (15) und (16) folgt, daß eine Modellierung mit $m_l \neq 1$ bei gleichzeitiger Berücksichtigung des elektrischen Strömungsfeldes und des dielektrischen Verschiebungsfeldes nicht möglich ist. Interessieren wie im vorliegenden Fall die Ummagnetisierungsverluste, also Vorgänge des elektrischen Strömungsfeldes, dann bildet die Grundlage zur Modellierung die Gl. (15).

2. Modellierung des Stahlringes [2]

Ausgehend von der Hauptmodellbeziehung Gl. (15) wird zunächst der Längenmaßstab gewählt und die Modellfrequenz bestimmt. Anschließend sind Festlegungen über das zu verwendende Material sowie den Maßstab der elektrischen oder magnetischen Feldgrößen zu treffen.

Im untersuchten Beispiel wurde das Modell dreifach kleiner als das Original ausgeführt, d.h. $m_l = 3$ und $m_t = 9$ zugrundegelegt, so daß die Modellfrequenz $f_M = 450$ Hz gegenüber einer Originalfrequenz $f_0 = 50$ Hz betrug. Die Abmessungen des Originals waren: Dicke 15 mm, Innendurchmesser 93 mm, Außendurchmesser 900 mm. Beide Ringe wurden aus Baustahl mit den magnetischen Eigenschaften nach Bild 1 gefertigt. Original- und Modellanordnung waren so konzipiert, daß für den Maßstab der magnetischen Feldgrößen sowohl $m_H = 1$ als auch $m_H = m_l = 3$ gewählt werden konnte. Der Maßstab $m_H = 1$ hat den Vorteil, daß im Original und im Modell im gleichen Bereich der Magnetisierungscharakteristik gearbeitet wird; nachteilig ist, daß dann entsprechend der Modellbeziehungen nach Tafel 1 im Modell m_l-fach höhere Stromdichten als im Original auftreten. Wird dagegen $m_G = 1$, d.h. $m_H = m_l = 3$ gewählt, ergeben sich im Modell zwar gleiche Verlustdichten wie im Original aber geringere magnetische Feldstärken, so daß Vergleichsmessungen an Originalanordnungen zur Fehlerabschätzung erforderlich sind.

3. Messung der Ummagnetisierungsverluste mit dem wattmetrischen Verfahren nach [3]

Bild 2 veranschaulicht die Meßschaltung. Vom Wattmeter wird die gesamte im Stahlring und im Wattmeterkreis umgesetzte Wirkleistung angezeigt. Nach Abzug der Verluste im Meßkreis ergeben sich die im Stahlring auftretenden Ummagnetisierungsverluste P_v. Im Bild 3 sind die so gemessenen Verluste für den Originalring sowie die auf das Original umgerechneten Verluste des Modellrings für $m_H = 1$ und $m_H = 3$ in Abhängigkeit von der magnetischen Oberflächenfeldstärke $\hat{H}_{0m}$ (quadratischer Mittelwert) dargestellt. Für $m_H = 1$ liegt die Abweichung zwischen den Meßwerten am Modell und Original ($\Delta P_v < \pm 2\%$) innerhalb der Meßgenauigkeit der wattmetrischen Methode. Für $m_H = 3$ ergeben sich am Modell mit steigender Sättigung des Ringmaterials zunehmend größere Werte als am Original. Das unterstreicht nochmals den obigen Hinweis auf die erforderlichen Vergleichsmessungen bei $m_H > 1$ (vor allem bei geometrisch komplizierten Gebilden, die der Berechnung schwer zugänglich sind.).

Tafel 1. Modellmaßstäbe für $m_l^2 = m_t$

Größe	Modellbeziehung		
	allgemein	für $m_G = 1$	für $m_H = 1$
magnetische Feldstärke H	$m_H = m_l m_G$	$m_H = m_l$	$m_H = 1$
elektrische Stromdichte G	$m_G = m_H m_l$	$m_G = 1$	$m_G = 1/m_l$
elektrische Durchflutung Θ	$m_\Theta = m_H m_l$	$m_\Theta = m_l^2$	$m_\Theta = m_l$
Verlustleistung p_v	$m_{Pv} = m_G^2 m_l^3$	$m_{Pv} = m_l^3$	$m_{Pv} = m_l$
Verlustleistungsdichte P_v	$m_{pv} = m_G^2$	$m_{pv} = 1$	$m_{pv} = 1/m_l^2$

Bild 1
μ-H-Kennlinie für Baustahl

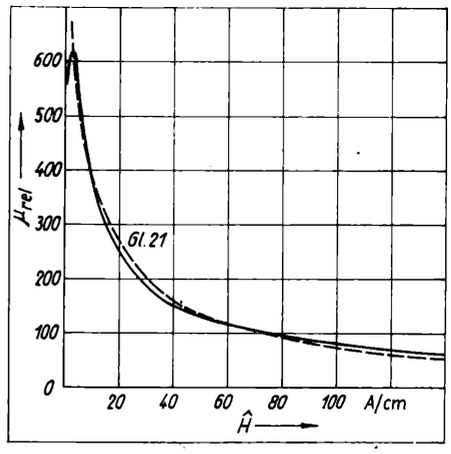


Bild 2. Meßschaltung
1 Stahlring, *2* Ringwicklung (Erregerwicklung)
2 Meßwicklung

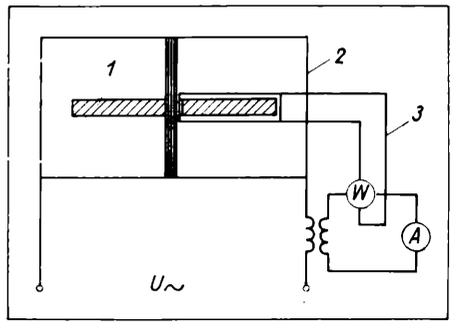
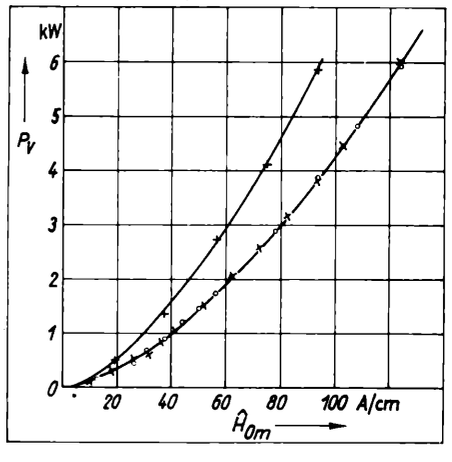
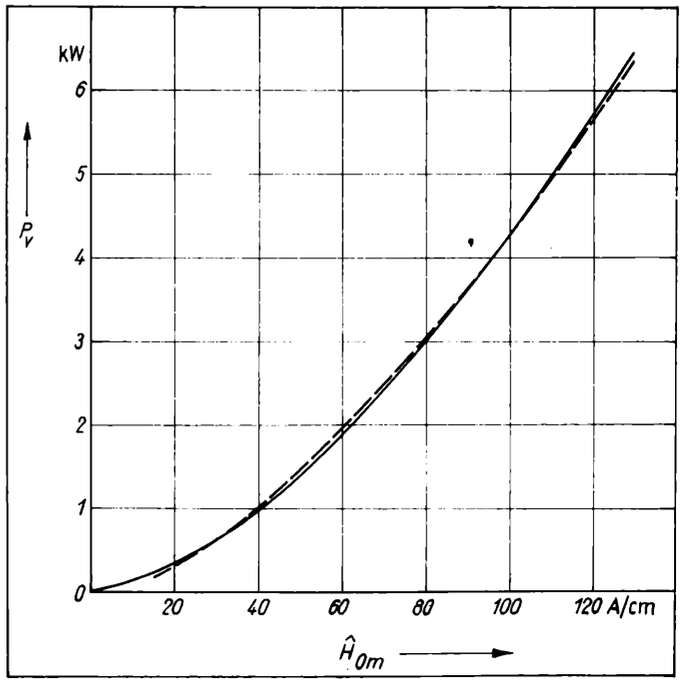


Bild 3
Ummagnetisierungsverluste der Stahlringe
-×- Originalring
-0- Modellring bei $m_H = 1$
-+- Modellring bei $m_H = 3$

Bild 4
Ummagnetisierungsverluste des Originalrings
——— Messung
- - - - - - - - Rechnung





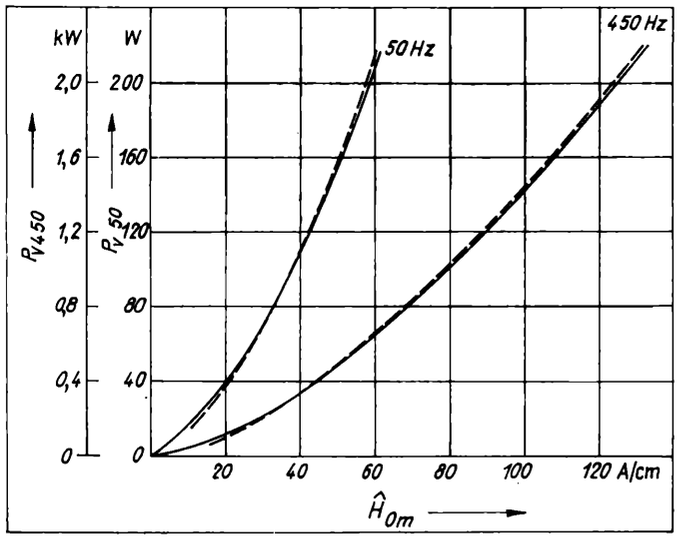


Bild 5. Ummagnetisierungsverluste des Modellrings
——— Messung ····· Rechnung

4. Berechnung der Ummagnetisierungsverluste

Gemäß [4] lassen sich die Ummagnetisierungsverluste massiver Stahlplatten unter Berücksichtigung der Stromverdrängung in guter Näherung auf eine Berechnung der Wirbelstromverluste multipliziert mit dem Faktor 1,35 zurückführen

$$P_v \approx 1{,}35\, P_{vwb} = 1{,}35\, K_{wb} \sqrt{\mu_{rel}}\, \hat{H}_0^2\, A. \tag{17}$$

Die in der Gleichung 17 enthaltene Oberflächenfeldstärke $\hat{H}_0$ berechnet sich für die Stahlringe in Abhängigkeit vom Radius r zu

$$\hat{H}_0 = \frac{\hat{I}_e\, w_e}{2\,\pi\, r} \tag{18}$$

und beträgt im Mittel über der Kreisringoberfläche A_0

$$\hat{H}_{0m} = \sqrt{\frac{1}{A_0} \int \hat{H}_0^2\, \mathrm{d}\, A_0} = \frac{\hat{I}_e\, w_e}{\pi} \sqrt{\frac{1}{2\,(r_2^2 - r_1^2)} \ln \frac{r_2}{r_1}} \tag{19}$$

(r_1 Innenradius; r_2 Außenradius).
Für die Kreisringhüllfläche A der Gl. 17 gilt

$$A = 2\,\pi\,(r_2^2 - r_1^2) + 2\,\pi\,\mathrm{d}\,(r_1 + r_2) \tag{20}$$

Vereinfachend wird weiterhin die in Gl. (17) benötigte Permeabilität wie folgt approximiert (vgl. Bild 1)

$$\mu_{rel} = \frac{8000\ \mathrm{A/cm}}{10\ \mathrm{A/cm} + \hat{H}}. \tag{21}$$

Die in Gl. (17) noch enthaltene Konstante K_{wb} bestimmt sich aus

$$K_{wb} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi f \mu_0}{\varkappa}} \tag{22}$$

(für Baustahl $\varkappa = 6\ \mathrm{m/\Omega\ mm^2}$)
Bild 4 zeigt die mit Gl. (17) nachgerechneten Ummagnetisierungsverluste für den Originalring im Vergleich zu den Meßwerten. In Bild 5 sind die Meßergebnisse und Rechenwerte für den Modellring bei $f = 50$ Hz und 450 Hz dargestellt. Die mittlere Abweichung zwischen Messung und Rechnung ist $< \pm 3\,\%$.

5. Zusammenfassung

Zur Messung der Ummagnetisierungsverluste eignen sich, wie am Beispiel eines massiven Stahlringes demonstriert wurde, geometrisch verkleinerte Modellanordnungen. Am genauesten (Abweichungen zwischen Original- und Modellmessung kleiner $\pm$ 2%) sind dabei Modelle mit $m_H = 1$; für $m_H > 1$ müssen zusätzliche Vergleichsmessungen zur Fehlerabschätzung an Originalanordnungen vorgenommen werden.
Die abschließende Nachrechnung der Ummagnetisierungsverluste der Stahlringe ergab Abweichungen von weniger als $\pm$ 3% zwischen Messung und Rechnung.

Literatur

[1] *Iwanow-Smolenski, A.:* Physikalische Modellierung elektrischer Maschinen mit Erhaltung der Ähnlichkeit der elektromagnetischen Felder. Elektrotechnicky Obzor 49 (1960) 10, S. 449 – 502

[2] *Metzner, H.:* Beitrag zur Bestimmung von Zusatzverlusten in Großtransformatoren unter Anwendung der Modellmethode. Diss. A TU Dresden, Sektion ET (1971)

[3] *Kubrycht, J.; Franzl, M.:* Wattmetrische Messung der Zusatzverluste. Elektrotechnicky obzor 50 (1961) 8, S. 335 – 339

[4] *Roseburg, D.:* Analytische Bestimmung der Zusatzverluste in ferromagnetischen Konstruktionsteilen von Großtransformatoren. ELEKTRIE, Berlin 31 (1977) 12, S. 634 – 635

EA 5433

Zur Anpassung von Schutzstromwandlern an den unabhängigen elektronischen Überstromzeitschutz

G. Gruhn, KDT, Leipzig

Der unabhängige elektronische Überstromzeitschutz zeichnet sich durch einen Meßbereich von minimal dem 0,2fachen bis maximal zum 40fachen des Nennstromes aus. Dabei ist der gesamte Meßbereich in Einstellbereiche unterteilt, wobei der Überstrombereich bis maximal zum 3,2fachen des Nennstromes reicht und der Hochstrombereich bereits beim 2fachen Nennstrom beginnen kann. Im Überstrombereich ist die Bewertung des Stromes in den Geräten nicht einheitlich. So wird entweder eine dem arithmetischen Mittelwert des gleichgerichteten Stromes proportionale Spannung [1], eine dem gleichgerichteten Strom proportionale, schwach geglättete und als Quasi-Effektivwert bezeichnete Spannung [2] oder das Überschreiten des Momentanwertes einer dem Strom proportionalen Spannung als Maß für den Effektivwert des Netzstromes bewertet [3] [4]. Die Hochstromstufen sind bei [2] [3] [4] als Schwellwertschalter ausgeführt. Verglichen wird der Momentanwert einer dem Strom proportionalen gleichgerichteten oder nicht gleichgerichteten Spannung mit dem als Effektivwert vorgegebenen Sollwert. Lediglich die Schutzgeräte von [1] bewerten auch im Hochstrombereich den arithmetischen Mittelwert des gleichgerichteten Stromes.
Kennzeichnend für die elektronischen Schutzgeräte ist ferner, daß die Fehlergrenzen in der Regel kleiner als bei den Geräten der ersten Generation sind. Sie liegen im Überstrombereich zwischen 1% und 2,5% und im Hochstrombereich zwischen 1% und 5%.
Die Potentialtrennung der elektronischen Schaltung erfolgt über Eingangsstromwandler. Damit wird das Übertragungsverhalten der Schutzeinrichtung wesentlich durch die Dimensionierung der Stromwandlerkaskade, bestehend aus Schutzstromwandler und Eingangswandler des Schutzgerätes bestimmt. Als weitere Besonderheit muß erwähnt werden, daß diese Schutzgeräte in 1-A-Ausführung für den Schutzstromwandler einschließlich der Leitungen in der Schaltzelle nur eine Bürde zwischen 0,3 Ω bis maximal 0,5 Ω bei einem Bürdenleistungsfaktor von $\cos\beta \approx 0{,}99 \cdots 1{,}0$ darstellen. Hieraus ergeben sich spezielle Anforderungen an die Auslegung und Anpassung induktiver Schutzstromwandler an diese Schutzgeräte. Die folgenden Ausführungen sollen dazu einen Beitrag leisten.

1. Übertragungsverhalten der Stromwandlereingangsschaltung

Der Einstellbereich des elektronischen Überstromzeitschutzes erstreckt sich vom Betriebsstrombereich bis zum Kurzschlußstrombereich des Elektroenergieversorgungsnetzes. Somit ist an die Stromwandlereingangsschaltung die Forderung zu stellen, sowohl oberschwingungsbehaftete Ströme des Betriebsstrombereiches, als auch Kurzschlußströme mit einer hinreichenden Genauigkeit zu übertragen.
Das Übertragungsverhalten der Stromwandlereingangsschaltung nach Bild 1 wird durch die beiden Differentialgleichungen

$$\frac{\mathrm{d}\, i_2}{\mathrm{d}\, t} + \frac{i_2}{T_2} = -\,\ddot{u}_2 \frac{\mathrm{d}\, i_s}{\mathrm{d}\, t}, \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}\, i_s}{\mathrm{d}\, t} + \frac{i_s}{T_s} + \ddot{u}_{12} \frac{\mathrm{d}\, i_2}{\mathrm{d}\, t} = -\,\ddot{u}_1 \frac{\mathrm{d}\, i_p}{\mathrm{d}\, t} \tag{2}$$

beschrieben. Hierin sind

$$T_2 = \frac{L_{2h} + L_{2\sigma}}{R_2 + R}, \tag{3}$$

$$T_s = \frac{L_{sh} + L_{s\sigma} + L_{1h} + L_{1\sigma}}{R_s + R_1} \tag{4}$$

Dozent Dr.-Ing. *Gerhard Gruhn* ist Wissenschaftsbereichsleiter an der Sektion Automatisierungsanlagen der Technischen Hochschule Leipzig.

Die Untersuchungen wurden im Auftrag der Forschungsgemeinschaft ELTRA durchgeführt.

die beiden Zeitkonstanten der Stromwandlerkreise und

$$\ddot{u}_2 = \frac{N_1}{N_2} \frac{L_{2h}}{L_{2h} + L_{2\sigma}}, \tag{5}$$

$$\ddot{u}_1 = \frac{N_p}{N_s} \frac{L_{sh}}{L_{sh} + L_{s\sigma} + L_{1h} + L_{1\sigma}}, \tag{6}$$

$$\ddot{u}_{12} = \frac{N_1}{N_2} \frac{L_{2h}}{L_{sh} + L_{s\sigma} + L_{1h} + L_{1\sigma}}, \tag{7}$$

die eingeführten Übersetzungsverhältnisse. Dabei beinhaltet der Widerstand R_1 den Widerstand der Zuleitung zum Schutzgeräteeingangswandler. Als Amplitudenfrequenzkennlinie im Betriebsstrombereich erhält man aus den Gleichungen (1) bis (7) die Beziehung

$$\frac{I_2(\omega)}{\ddot{u}_1 \ddot{u}_2 I_p(\omega)} \approx \frac{\omega^2 T_2 T_s}{\sqrt{(1 - \omega^2 T_2 T_s)^2 + \omega^2 (T_2 + T_s)^2}}, \tag{8}$$

da das Produkt der Übersetzungsverhältnisse $\ddot{u}_{12}\, \ddot{u}_2 \ll 1$ ist und somit das System als entkoppelt angesehen werden kann. Die Beziehung für die Phasenfrequenzkennlinie ist

$$\varphi = \arctan \frac{\omega (T_2 + T_s)}{\omega^2 T_2 T_s - 1}. \tag{9}$$

Zur Beurteilung des Fehlerverhaltens im Betriebs- und Überstrombereich werden der Stromfehler

$$F_{I2} = \frac{\frac{k}{\ddot{u}_1 \ddot{u}_2} I_2(\omega) - I_p(\omega)}{I_p(\omega)} \tag{10}$$

und der Fehler der Phasenverschiebung

$$F_{\varphi\nu} = \frac{\varphi(\omega_\nu) - \nu \varphi(\omega_1)}{\nu \varphi(\omega_1)} \tag{11}$$

eingeführt. In Gl. (10) wird k zweckmäßig so gewählt, daß der Fehler bei der Frequenz der Grundschwingung Null wird. Der Definition des Fehlers der Phasenverschiebung liegt die Überlegung zugrunde, daß ein oberschwingungsbehafteter Strom vom Schutzgerät dann richtig bewertet wird, wenn die Harmonischen frequenzproportional in der Phase gedreht werden. Eine frequenzproportionale Phasendrehung der Harmonischen wirkt sich praktisch nur auf die Laufzeit des Signals aus. Signallaufzeiten zwischen 2,5 ms und 5 ms wären durchaus vertretbar.

Bild 2 zeigt den Stromfehler der Wandlereingangsschaltung. Bereits bei Zeitkonstanten $T_2 \geqq 10$ ms und $T_s \geqq 20$ ms, wobei die Werte vertauschbar sind, werden Harmonische mit Fehlern $F_{I2} \leqq 6\,\%$ übertragen.

Da die Harmonischen nur prozentuale Anteile der Grundschwingung sind, liegt der Fehler des Effektivwertes des Gesamtstromes bis zu einem Klirrfaktor von 30 % unter 0,6 %. Aus den Gleichungen (9) und (11) ist erkennbar, daß die frequenzproportionale Phasendrehung prinzipiell nicht erreichbar ist. Im Bereich der Zeitkonstanten von $T_2 = T_s = (5-200)$ ms liegen für Frequenzen von 100 Hz bis 500 Hz die Phasenfehler zwischen $-75\,\%$ und $-99\,\%$ (Bild 3).

Gleichung (11) darf nicht darüber hinwegtäuschen, daß mit größer werdenden Zeitkonstanten die Absolutwerte der Phasenverschiebungen zwischen Grund- und Oberschwingungen abnehmen und die Mittelwertsbildung des gleichgerichteten Stromes dann genauer wird. Aus diesen Überlegungen folgt, daß bei einer Effektivwertbewertung der stromproportionalen Spannung die geringsten Anforderungen an die Stromwandler zu stellen sind, da durch Windungsabgleich der Wandler eine genaue Effektivwertübertragung auch bei kleinen Zeitkonstanten gewährleistet ist. Bei Schutzeinrichtungen die den arithmetischen Mittelwert der gleichgerichteten Ausgangsgröße der Stromwandlerkaskade bewerten, haben die Zeitkonstanten der Wandler Einfluß auf die Größe des arithmetischen Mittelwertes. Die zulässigen Zeitkonstanten der Wandler wurden

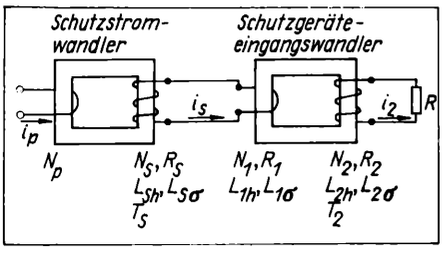


Bild 1 Stromwandlereingangsschaltung

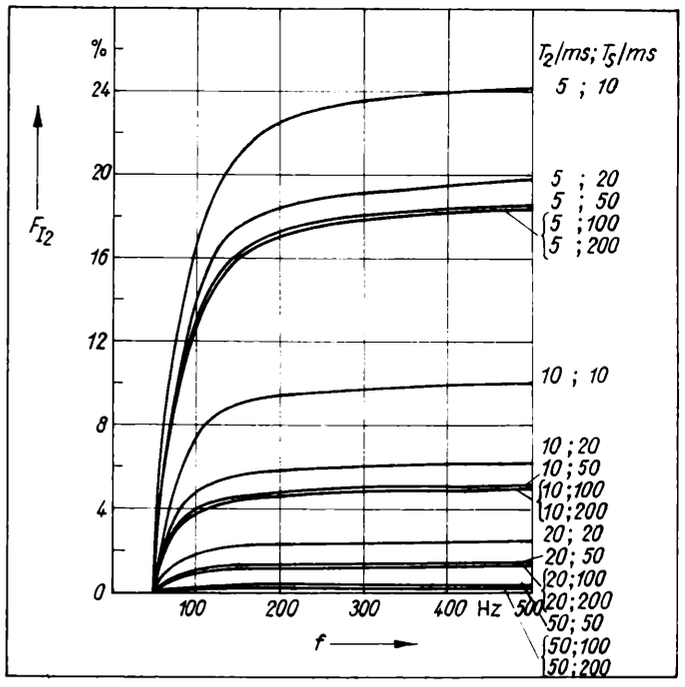


Bild 2. Stromfehler der Wandlereingangsschaltung

über den Weg der Analyse von oberschwingungsbehafteten Netzvorgängen bestimmt. Dazu wurden in industriellen Netzen, die einen höheren Oberschwingungsgehalt als öffentliche Netze aufweisen, die Harmonischen nach Betrag und Phasenlage sowie die Effektivwerte der Ströme und die arithmetischen Mittelwerte der gleichgerichteten Ströme $\bar{I}_p$ bestimmt. Dabei zeigte sich, daß der Strom $\bar{I}_p$ bis zu einem Klirrfaktor von 30 % ein hinreichend genaues Maß für den Effektivwert ist [5]. In Abhängigkeit von den Zeitkonstanten der Stromwandlerkaskade wurde ferner für die analysierten Vorgänge der arithmetische Mittelwert des gleichgerichteten Wandlerausgangsstromes $\bar{I}_2$ berechnet und der Fehler der arithmetischen Mittelwerte

$$F_{\bar{I}} = \frac{\frac{k}{\ddot{u}_1 \ddot{u}_2} \bar{I}_2 - \bar{I}_p}{\bar{I}_p} \tag{12}$$

bestimmt. Es konnte nachgewiesen werden, daß für Klirrfaktoren des Stromes bis zu 25 % und für Wandlerzeitkonstanten $T_2 = T_s = 10$ ms der Fehler unter $\pm\, 3\,\%$ liegt. Dabei wurde das Übersetzungsverhältnis so festgelegt, daß für die Grundschwingung der Fehler Null wird.

Im Kurzschlußstrombereich können sowohl gleichstromverlagerte als auch unverlagerte Vorgänge auftreten. Unverlagerte Ströme werden dann richtig bewertet, wenn der Spitzenwert des Stromes durch die Stromwandlerkaskade mit hinreichender Genauigkeit übertragen wird. Eine höhere Forderung muß bei momentanwertbewertenden Schutzeinrichtungen nicht gestellt werden. Zur Ableitung von Anforderungen an das Übertragungsverhalten der Stromwandlerkaskade müssen die Gleichungen (1) und (2) als nicht-

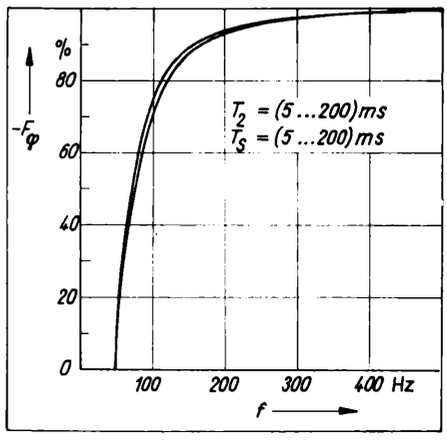


Bild 3 Phasenfehler der Wandlereingangsschaltung

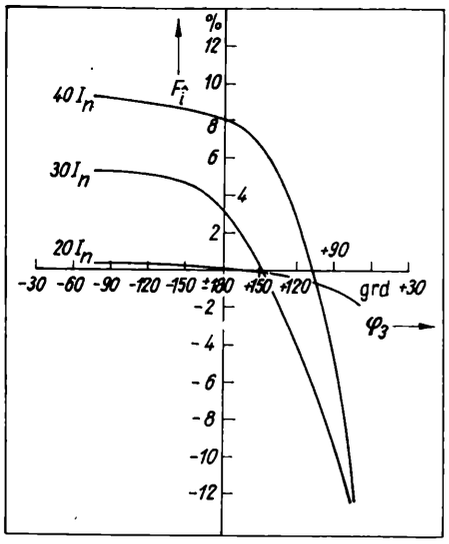


Bild 4
Einfluß der 3. Harmonischen auf den Größtfehler der Hochstromstufe

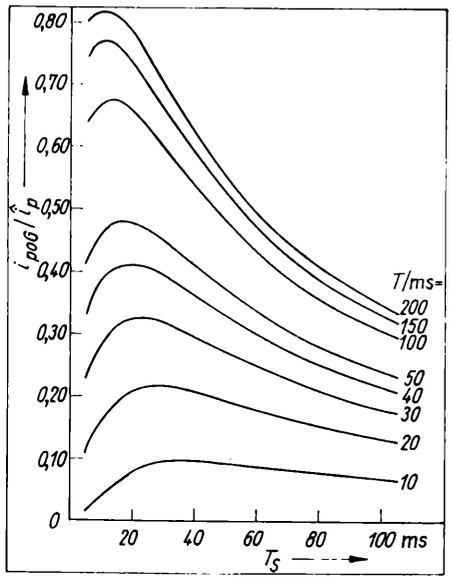


Bild 5
Gleichanteil des bezogenen Magnetisierungsstromes $i_p\,(t_k)$ für $t_k = 50$ ms

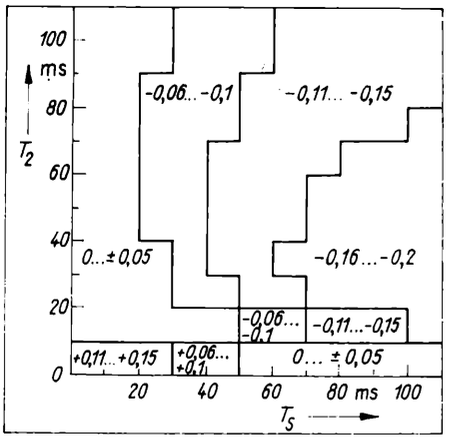


Bild 6
Gleichanteil des bezogenen Magnetisierungsstromes $i_{s0}\,(t_k)$ für $T = 30$ ms und $t_k = 50$ ms

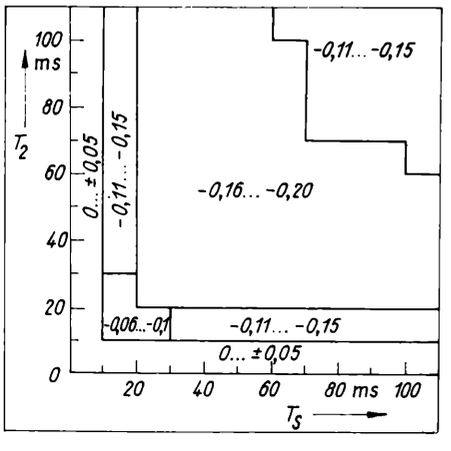


Bild 7
Gleichanteil des bezogenen Stromes $i_2\,(t_k)$ für $T = 30$ ms und $t_k = 50$ ms

lineare Differentialgleichungen aufgefaßt werden. Die Untersuchungen erfolgten über die nichtlineare Modellierung des Schutzgeräteeingangswandlers und seine Beaufschlagung mit den mittels Transientenspeicher aufgenommenen und analysierten Harmonischen realer Schutzstromwandler im Überstromgebiet. Modelliert wurde der Eingangswandler der 2. Schutzgerätegeneration von KEAW.

Bestimmt wurde der Fehler des Spitzenwertes des Schutzgeräteeingangswandlers

$$F_i = \frac{K\hat{i}_2 - \hat{i}_s}{\hat{i}_s}, \tag{13}$$

wobei das Übersetzungsverhältnis K so festgelegt wurde, daß bei sinusförmigem Sekundärstrom der Wandler fehlerfrei ist. Diese Festlegung ist zulässig, da im Schutzgerät dieselbe Maßnahme durch die Wahl der Vergleichsspannungen am Komparator realisiert ist.

2. Untersuchungsergebnisse

1. Schutzstromwandler übertragen den Spitzenwert des Stromes bis zu Werten, die, je nach Auslegung, Bürde und Bürdenleistungsfaktor der Wandler, 10% bis 30% über den Werten liegen, die durch den Genauigkeitsnenngrenzfaktor festgelegt sind, ohne den Fehler der Spitzenwerte

$$F_i = \frac{K_n\,(\hat{i}_s - \hat{i}_p)}{\hat{i}_p} \tag{14}$$

von -10% zu überschreiten. Im Sekundärstrom tritt die 3. Harmonische mit einem Anteil von maximal 20% der Grundschwingung auf. Ihre Phasenlage kann gemäß der Beziehung

$$i_s = \sum_{\nu=1}^{n} \hat{i}_{s\nu} \sin\,(\omega_\nu t + \varphi_\nu)\,, \tag{15}$$

wobei ν ungeradzahlig ist, im Bereich von $\varphi_3 = (-75° \cdots -180, +180° \cdots +75°)$ liegen. Da der Anteil der 3. Harmonischen dominierend ist, wurde nur diese Harmonische bei den Untersuchungen berücksichtigt, d.h. bei konstantem Anteil der 3. Harmonischen von 20% wurde in Abhängigkeit von der Phasenlage der Harmonischen für verschiedene Einstellwerte des Stromes der Fehler der Hochstromstufe bestimmt.

2. Im Bild 4 ist der Einfluß der 3. Harmonischen auf den Größtfehler dargestellt. Die starke Abhängigkeit des Fehlers vom Einstellwert des Stromes ist auf die große Sättigung des Schutzgerätewandlers im Bereich von $30\,I_n$ bis $40\,I_n$ zurückzuführen. Es läßt sich die Schlußfolgerung ziehen, daß weniger stark gesättigte Schutzgeräteeingangswandler einen höheren Übertragungsbereich der Schutzstromwandler zulassen und somit insgesamt ökonomische Vorteile bringen würden.

Gleichstromverlagerte Vorgänge führen bekanntlich zu Sättigungserscheinungen in Stromwandlern während des Übergangsvorganges, wenn die Zeitkonstanten der Stromwandler nicht hinreichend groß sind. Da die Gleichstromverlagerung vom Kurzschlußzeitpunkt abhängt, Schutzgeräte aber eigentlich den Effektivwert des stationären Kurzschlußwechselstromes bewerten sollen, ist die meßtechnische Erfassung des Gleichanteils unerwünscht. Infolge der Einschaltstabilisierung der Hochstromstufe mit einer Zeit von $t_k = 50$ ms ist daher möglichst zu gewährleisten, daß der Einfluß des Gleichanteiles zu bzw. nach diesem Zeitpunkt gering ist und Sättigungen der Wandler nicht zu unzulässig großen Oberschwingungen im Strom führen. Unter der Voraussetzung konstanter Parameter der Stromwandlerkaskade wurden daher die Gleichanteile der bezogenen Magnetisierungsströme beider Wandler und des Sekundärstromes des Schutzgeräteeingangswandlers

$$\frac{i_{poG}\,(t_k)}{\hat{i}_p}, \quad \frac{i_{soG}\,(t_k)}{\hat{i}_p\,\ddot{u}_1}, \quad \frac{i_{2G}\,(t_k)}{\hat{i}_p\,\ddot{u}_1\,\ddot{u}_2} \tag{16}$$

für den voll verlagerten Vorgang

$$i_p = \hat{i}_p \left(-\cos\omega t + \mathrm{e}^{-\frac{t}{T}}\right) \tag{17}$$

berechnet [5].

Die Bilder 5, 6 und 7 zeigen eine Auswahl der Ergebnisse. Es ist erkennbar, daß kleine Zeitkonstanten der Wandler zu kleinen Gleichanteilen im Ausgangsstrom des Schutzgeräteeingangswandlers und zu relativ großen Magnetisierungen des Schutzstromwandlers führen. Wird dagegen die Zeitkonstante des Schutzstromwandlers

groß gewählt, sättigt sich der Schutzgeräteeingangsstromwandler. Beim KEAW-Gerät liegt die „Zeitkonstante" im Bereich von $T_2 = (100 \cdots 5)$ ms, ist also stark aussteuerungsabhängig. Somit ist es zulässig, daß sich auch die Schutzstromwandler vorübergehend sättigen, d.h. sie können für den Überstromzeitschutz mit weitaus niedrigeren „Zeitkonstanten" als üblich ausgeführt werden.

Berechnungen am modellierten nichtlinearen Schutzstromwandler, der bezüglich der Nennbürde und des Genauigkeitsnenngrenzfaktors an das Schutzgerät von KEAW angepaßt wurde, führten zu folgenden Ergebnissen:

1. Schutzstromwandler mit üblichen Zeitkonstanten von $T_s = 240$ m im linearen Übertragungsbereich erreichen beim 10- bis 40fachen Nennstrom bei der derzeitig am häufigsten auftretenden Netzzeitkonstante von $T = 30$ ms den Wert von 95 % des stationären Endwertes in der unverzerrten Halbwelle 60 ms bis 80 ms nach Kurzschlußeintritt.
2. Durch Linearisierung des Schutzstromwandlers und Absenken der Zeitkonstante auf $T_s = 70$ ms wird unter gleichen Bedingungen dieser Wert bereits nach 40 ms bis 60 ms erreicht.
3. Durch die Linearisierung wird der Anteil der Harmonischen in den verzerrten Halbwellen des Sekundärstromes herabgesetzt.

3. Anpassung der Schutzstromwandler

Schichtkernstromwandler für Schutzzwecke haben eine stark sättigungsabhängige Streuinduktivität. Fehlermessungen an derartigen Stromwandlern, auf die in einem gesonderten Beitrag eingegangen wird, beweisen, daß somit Berechnungen von Genauigkeitsgrenzfaktoren bei weit auseinanderliegenden Bürdenwerte und vorgegebenem Genauigkeitsnenngrenzfaktor nicht möglich sind, da der Wandlerhersteller höchstens einen konstanten Wert des Streublindwiderstandes ausweisen kann. Somit ergeben sich aus mehreren Gründen Forderungen an die Kennzeichnung derartiger Schutzstromwandler.

Schutzstromwandler für den Überstromzeitschutz von KEAW in 1-A-Ausführung sollten eine Nennleistung von $S_n = 1$ VA und einen Genauigkeitsnenngrenzfaktor von $P = 40$ haben. Der Bürdenleistungsfaktor ist $\cos \beta_B = 1$. Die Berechnung der Genauigkeitsgrenzfaktoren bei Bürdenwerten, die das 0,5fache oder 2fache der Nennbürde haben, ist unter Angabe eines konstanten Wertes des Streublindwiderstandes und des ohmschen Widerstandes der Sekundärwicklung auf der Basis der Gleichsetzung der induzierten Spannungen in der Sekundärwicklung möglich. Streublindwiderstand und ohmscher Widerstand müssen auf dem Leistungsschild angegeben werden.

Um die Genauigkeit der Schutzstromwandler der Genauigkeit der Schutzgeräte im Hochstrombereich anzupassen, sollten Schutzstromwandler im gesamten Übertragungsbereich den Fehler der Effektivwerte

$$F_I = \frac{K_n I_s - I_p}{I_p} \tag{18}$$

mit einer Fehlergrenze $\leqq \pm 3\,\%$ einhalten.

Durch Linearisierung der Wandlerkerne mit Luftspalten von ungefähr 0,5 mm bis 1 mm, kann bei gleichem Materialeinsatz das dynamische Verhalten der Schutzeinrichtung verbessert werden. Durch diese Linearisierung erreicht man Wandlerzeitkonstanten, die im linearen Bereich bei $T_s \approx (40 \cdots 100)$ ms liegen. Derartige Schutzstromwandler können durchaus noch den Forderungen nach einem Gesamtfehler von $F_g = 10\,\%$ entsprechen.

4. Zusammenfassung

Das Fehlerverhalten des unabhängigen elektronischen Überstromzeitschutzes wird wesentlich durch die Stromwandlereingangsschaltung, bestehend aus dem Schutzstromwandler und dem Schutzgeräteeingangswandler, beeinflußt. Das Übertragungsverhalten der Wandlereingangsschaltung wird im Betriebsstrom- und Kurzschlußstrombereich untersucht. Spezielle Aussagen erfolgen für den Überstromzeitschutz von KEAW. Die Ergebnisse zeigen, daß Schutzstromwandler nicht den hohen Anforderungen entsprechen müssen, die allgemein gestellt werden, da diese von den Schutzgeräteeingangswandlern gleichermaßen nicht erfüllt werden können. Zur besseren Anpassung der Schutzstromwandler in 1-A-Ausführung ist es erforderlich, diese mit einer Nennleistung von ungefähr $S_n = 1$ VA bei einem Bürdenleistungsfaktor $\cos \beta_B = 1$ und einem Genauigkeitsnenngrenzfaktor von 40 auszuweisen. Dieser Wert der Nennleistung wird beim Überstromzeitschutz praktisch nicht überschritten. Durch Angabe des sekundären Streublindwiderstandes und des ohmschen Widerstandes auf dem Leistungsschild sind für abweichende Bürdenwerte bei Einhaltung gleicher Fehler der Effektivwerte die Genauigkeitsgrenzfaktoren auf der Basis der gleichen induzierten Spannung berechenbar. Der Fehler der Effektivwerte sollte dem des Schutzgerätes angepaßt werden und im Hochstrombereich eine Fehlergrenze von $\pm 3\,\%$ nicht überschreiten. Vorteilhaft wirkt sich eine Linearisierung des Magnetkreises und somit eine Absenkung der Wandlerzeitkonstante aus. Dazu wurden theoretische Untersuchungen am nichtlinearen Wandlermodell durchgeführt, bei dem die Zeitkonstante von 240 ms im linearen Übertragungsbereich auf 70 ms gesenkt wurde. Bei Senkung der Wandlerzeitkonstante auf $T_s = (40 \cdots 100)$ ms kann die Forderung nach Einhaltung eines Gesamtfehlers von $F_g = 10\,\%$ noch erfüllt werden.

Literatur

[1] Kraftwerkselektronik-Maschinenschutz in vollelektronischer Ausführung. ELIN-UNION Wien, Prospekt 1977-03-25

[2] Elektronische Schutztechnik in Einschubtechnik. EAW – Kurzinformation, Ag 26/024/81

[3] Meßrelais und Schutzrelais in Einschubtechnik. Lieferprogramm AEG-Telefunken: 1978/79, 3.78

[4] Meß- und Schutzrelais in Gehäusebauweise. Lieferprogramm AEG-Telefunken: 1981/82, 02.81

[5] *Gruhn, G.:* Untersuchung des Ansprechverhaltens von Schutzgeräten der 2. Generation. ELTRA-Forschungsbericht 1980/1981, TH Leipzig, Sektion Automatisierungsanlagen

EA 5434

Ausgewählte Probleme bei Messungen an elektrischen Maschinen

E. Bunzel, KDT; M. Hauptmann, KDT; K.-H. Kunckel, KDT; E. Paulig, KDT; P. Schubert, KDT; Dresden

Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. *Werner Brendler* zum 60. Geburtstag gewidmet.

Die elektrische Maschine stellt aus der Sicht des Meßtechnikers ein ausgesprochen interessantes und vielseitiges Objekt dar (Bild 1). Betrachtet man zunächst unter Annahme idealer Verhältnisse die Energiewandlung selbst, so sind zur Beurteilung des Betriebsverhaltens Messungen von **elektrischen Größen** (Ströme und Spannungen), von **mechanischen Größen** (Drehzahlen und Drehmomente) und **magnetischen Größen** (Induktionen und Feldstärken) notwendig. Besonders relevant aber sind Messungen von Erscheinungen, die als unerwünschte Nebeneffekte bei der Umwandlung von Energie immer auftreten und die sowohl *lebensdauerbestimmend*, als auch *umweltbelastend* sind und letztlich vorwiegend unter dem Sammelbegriff „Verluste" zusammengefaßt werden können. Die wesentlichsten Meßaufgaben sind:

- Erwärmungsmessungen (hot-spot-Messungen)
- Schwingungs- und Geräuschmessungen
- Verschleißmessungen (Lager, Gleitkontakte)
- Kommutierungsmessungen (Bürstenfeuer) und HF-Störpegelmessungen
- Messung chemischer Veränderungen an Isolierstoffen (Alterung).

Bei aller Vielfalt der technischen Realisierung läßt sich bei all diesen Meßeinrichtungen die Grundstruktur gemäß Bild 2 erkennen. Während für Anpasser und Ausgeber normalerweise konfektionierte Geräte verfügbar sind, müssen die Aufnehmer zur erfolgreichen Lösung der Meßaufgabe stets an das Meßobjekt in Funktionsprinzip, Signalpegel, Größe usw. adaptiert werden. Eine Zusammenstellung der für Messungen nichtelektrischer Größen an und in elektrischen Maschinen häufig verwendeten Aufnehmer wird in den Tafeln 1 und 2 gegeben. Bei der Implantation des Fühlers in oder an die elektrische Maschine oder das Meßobjekt allgemein, sind stets zwei Gesichtspunkte zu beachten:

Prof. Dr. sc. techn. *Eberhard Paulig* ist ordentlicher Professor an der Sektion Elektrotechnik der Technischen Universität Dresden. Dr.-Ing. *Karl-Heinz Kunckel* ist Dozent, Dr.-Ing. *Eckehard Bunzel* und Dr.-Ing. *Peter Schubert* sind wissenschaftliche Oberassistenten, Dr.-Ing. *Michael Hauptmann* ist wissenschaftlicher Assistent an der gleichen Bildungseinrichtung.

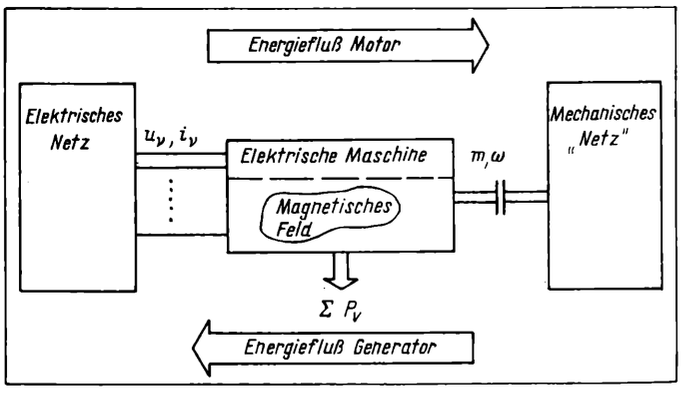


Bild 1. Meßobjekt „Elektrische Maschine"

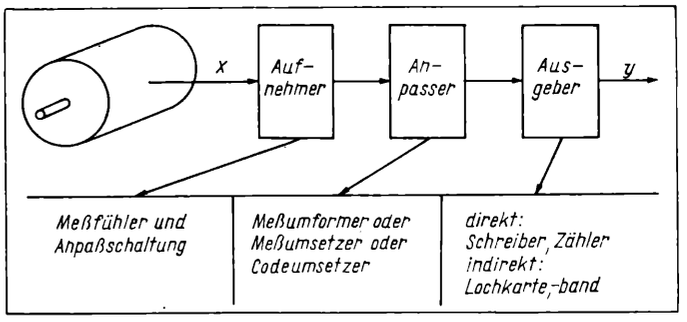


Bild 2. Grundstruktur der Meßeinrichtungen

Tafel 1. Passive Aufnehmer

Widerstand	Induktivität	Kapazität
– Kontaktstellung	– veränderliche Permeabilität	– veränderliche Permittivität
– Dehnung	– Variation Luftspalt	– mobile Elektroden
– Temperatur	– Variation Verlustfaktor	– veränderliche Fläche
– Beleuchtungsstärke	– Differential-induktivität	– Differential-kondensator
– magnetische Induktion		

1. Der Meßfühler darf die Struktur des Meßobjekts und damit die Meßgröße nicht oder nicht nennenswert beeinflussen (Messungen an Mikromaschinen!)
2. Zwischen dem zu bestimmenden Parameter (Meßergebnis) und der eigentlichen Meßgröße muß ein reproduzierbarer deterministischer Zusammenhang existieren (Abbildungstreue).

Nachfolgend werden einige konkrete Meßbeispiele vorgestellt.

1. Drehmomentmessung

Die Messung mechanischer Größen stellt für die Prüfung von elektrischen Maschinen eine wichtige Aufgabe dar. Von besonderer Bedeutung sind dabei die Drehzahl und das Drehmoment. Es existieren eine Reihe von Verfahren, die jedoch den Anforderungen des Prüffelds nie in allen Parametern gerecht werden. Ein besonderes Problem ist die Messung von pulsierenden Momenten, die bei umrichtergespeisten Drehfeldmaschinen auftreten. Die herkömmlichen Drehmomentmeßeinrichtungen, wie Pendelgenerator, Seilscheibe, Wirbelstrombremse, Dehnmeßwelle, u.v.a. sind im allgemeinen nicht in der Lage, schnelle Momentenänderungen abzubilden, d.h. es ist keine dynamische Drehmomentmessung möglich. Deshalb wurde im Zusammenhang mit der Untersuchung von umrichtergespeisten permanenterregten Drehstromsynchronmaschinen nach neuen Drehmomentmeßverfahren gesucht. Die Lösung wurde darin gefunden, daß das Drehmoment aus den elektrischen Größen der Maschine abgeleitet wird. Unter der Voraussetzung, daß die Ständerwicklung nur mit dem Grundwellenfeld verkettet ist, gilt für das Drehmoment folgende Beziehung:

$$m = \frac{P}{\sqrt{3}} \left[\psi_a (i_b - i_c) + \psi_b (i_c - i_a) + \psi_c (i_a - i_b)\right] \quad (1)$$

Die Flußverkettungen ψ_ν werden durch Integration der in den Wicklungen induzierten Spannungen gewonnen.

$$\psi_\nu = -\int e_\nu \, dt \quad (2)$$

Die Anordnung zur Ermittlung des Drehmoments aus den elektrischen Maschinengrößen ist demzufolge ein fest programmierter Analogrechner, dessen Blockschaltbild im Bild 3 dargestellt ist. Im Meßwertaufnehmer werden die Strangströme i_a, i_b, i_c mittels Shunt, sowie die induzierten Spannungen mit EMK-Brücken bereitgestellt. Der Meßwertaufnehmer ist so dimensioniert, daß der Fehler der EMK, der durch die Zunahme der Wicklungstemperatur auftritt, unter 1% bleibt.

Tafel 2. Aktive Aufnehmer

Spannung als Meßsignal	Strom als Meßsignal	Ladung als Meßsignal
– Thermoelement	– Fotoelement	– Piezokristall
– Hallelement	– Fotodiode	
– Tauchspule/Tauchkern	– Fototransistor	
– Meßspule		
– Tachometergenerator		

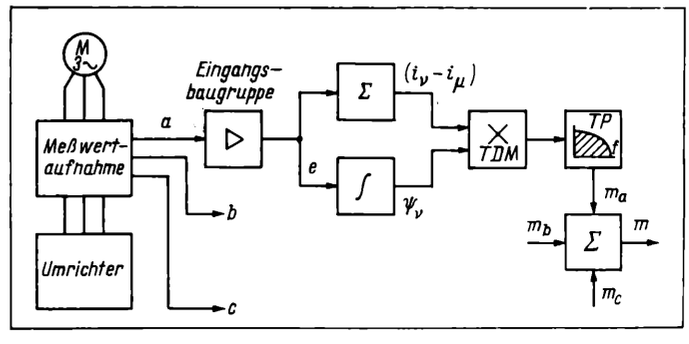
Die Eingangsbaugruppe ermittelt aus den vom Meßwertaufnehmer abgegebenen Signalen stromproportionale Spannungen und den Flußverkettungen proportionale Spannungen. Die Baugruppe „Differenzverstärker" bildet den Wert $(i_\nu - i\,\mu)\,k = u_i$ und der Integrator bestimmt den Wert für ψ_ν aus der EMK e_ν und stellt somit die Spannung u_ψ für den Multiplizierer bereit. Dieser muß in einem Frequenzbereich von 0 Hz bis etwa 8 kHz arbeiten, so daß der Multiplizierer nach dem Time-Diversion-Verfahren (TDM) realisiert wurde. Dieses Verfahren, das auch im Zusammenhang mit anderen Meßproblemen, z.B. dem elektro-optischen Stromwandler, untersucht wurde, zeichnet sich durch gute Übertragungseigenschaften bei geringem Aufwand (keine Thermostabilisierung) aus.
Ein nachgeschaltetes Filter unterdrückt die Trägerfrequenz des Multiplizierers und mit einem Summierer werden die Momentenanteile der drei Stränge zusammengefaßt.
Das realisierte elektronische Drehmomentmeßgerät wurde unter verschiedenen Bedingungen (500-Hz-Einspeisung und Umrichtereinspeisung) erprobt. Der ermittelte Fehler liegt unter 5%, der lineare Zusammenhang zwischen dem inneren Moment der Synchronmaschine und der Ausgangsspannung des Meßgeräts ist gewährleistet und die pulsierenden Momente lassen sich als überlagerte Wechselspannung über dem Mittelwert der Ausgangsspannung nachweisen. Weiterführende Untersuchungen ergaben, daß mit diesem Verfahren auch Drehmomentmessungen an zweiphasigen Maschinen möglich sind.

2. Magnetische Messungen an rotierenden elektrischen Maschinen

Die Prüfung an elektrischen Maschinen nach TGL 20675 umfaßt die Bestimmung der elektrischen und mechanischen Kennwerte des untersuchten Maschinentyps. Im Stadium der Entwicklung elektrischer Maschinen für neuartige Anwendungsfälle, z.B. bürstenlose Gleichstrommaschinen, dauermagneterregte Synchronmaschinen (dSM) mit Anlaufkäfig, und zur Schaffung treffsicherer Berechnungsalgorithmen sind jedoch zusätzliche Messungen erforderlich, die eine Aussage über das magnetische Feld im Luftspalt liefern.
Sie erbringen den endgültigen Nachweis

- ob ein bestimmter angestrebter Feldverlauf (z.B. rechteck- oder trapezförmiger Feldverlauf im Elektronikmotor) mit Hilfe der vorgenommenen konstruktiven Maßnahmen erreicht wurde
- wie groß der Einfluß der Nutung auf die Feldkurve tatsächlich ist (sie besitzen z.B. Auswirkungen auf die Rundlaufeigenschaften drehzahlvariabler Drehstromantriebe)

Bild 3. Blockschaltbild der Drehmomentmeßeinrichtung



– wie eine gleichmäßige und vollständige Aufmagnetisierung der zur Erregung des magnetischen Feldes eingesetzten Dauermagnete erreicht wurde und schließlich
– ob die der Berechnung des magnetischen Kreises zugrunde gelegten Feldverhältnisse den tatsächlichen entsprechen.

Für elektrische Maschinen besitzen die Messungen mittels Hallsonde ($U_H \sim B$), Feldplatte ($R \sim B$) und Meßspule $\left(U_0 \sim \frac{d}{dt}(\Phi(t,x))\right)$ praktische Bedeutung. Hinsichtlich der Meßergebnisse, die mit Hallsonden (Feldplatten) und Meßspulen gewonnen werden, bestehen prinzipbedingte Unterschiede. Bild 4 zeigt den Ausschnitt einer dSM in schematischer, gestreckter Darstellung. Im Luftspalt der dSM sind eine Durchmesser-Meßspule (Sp) und eine Hallsonde (H) angeordnet, die in beliebige Lagen gebracht werden können. Folgende Ergebnisse lassen sich für $I_a = 0$ mit diesen Meßanordnungen gewinnen:

Messungen mit der Hallsonde:

a) $\vartheta = \text{const.}, -\frac{\tau_N}{2}\frac{\pi}{\tau_p} \leqq \vartheta \leqq \frac{\tau_N}{2}\frac{\pi}{\tau_p}$

Lage der Meßsonde: $-\frac{\pi}{2} \leqq \gamma_H \leqq \frac{\pi}{2}$

Meßergebnis: $B_\delta = f(x, \vartheta)$
Feldkurven für unterschiedliche Ständer-Läuferstellungen

Im Bild 5 sind die für zwei extreme Stellungen ermittelten Feldkurven einer 12-poligen dSM dargestellt. Es ist zu beachten, daß nicht nur die Feldkurvenform und der über die Nutteilung gemittelte Maximalwert der Induktion $B_{\delta,\max}$ stellungsabhängig sind, sondern auch der Luftspaltfluß Φ_δ (bzw. die mittlere Luftspaltinduktion $B_{\delta,m}$) infolge der Schwankungen des Luftspaltleitwertes periodisch mit der Nutfrequenz pulsiert.

b) $\vartheta = \Omega_L t$, $\Omega_L = \text{const.}$

Lage der Meßsonde: $\Gamma_H = \frac{\tau_N}{2}\frac{\pi}{\tau_p}$

Meßergebnis: $B_\delta\left(x' = \frac{\tau_N}{2}\right) = f(\vartheta)$

Der gemessene Verlauf entspricht der Feldkurve $B_\delta = f(x)$ bei ungenutetem Ständer mit $\delta = \delta_0$, die von einem mit Nutfrequenz pulsierendem Wechselanteil überlagert ist.

c) $\vartheta = \Omega_L t$, $\Omega_L = \text{const.}$

Lage der Meßsonde: $\gamma_H = 0$, $\Gamma_H = \Omega_L t$

Meßergebnis: $B_\delta(x = 0) = f(\vartheta)$

Ein mit Nutfrequenz infolge der Luftspalt-Flußschwankungen und der Nutungseinbrüche (siehe Bild 5) pulsierender Feldverlauf ist deutlich erkennbar.

d) $\vartheta = \text{const.} -\frac{\tau_N}{2}\frac{\pi}{\tau_p} \leqq \vartheta \leqq \frac{\tau_N}{2}\frac{\pi}{\tau_p}$

Lage der Meßspule: $\Gamma_{Sp} = \Omega_{Sp} t$, $\Omega_{Sp} = \text{const}$

Meßergebnis: $U_0(t) = \frac{2}{\pi} w_{Sp} \tau_p l_i \Omega_{Sp} B_\delta\left(x - \frac{\tau_p}{\pi}\vartheta - \frac{\tau_p}{2}\right)$

Der zeitliche Verlauf der in der Meßspule induzierten Spannung ist proportional der Feldkurve (siehe Messung a).

e) $\vartheta = \Omega_L t$, $\Omega_L = \text{const.}$

Lage der Meßspule: $\gamma_{Sp} = 0$, $\Gamma_{Sp} = \Omega_L t$

Meßergebnis:

$$U_0(t) = -w_{Sp}\frac{d}{dt}(\Phi_\delta(t)) \approx N\,\Omega_L\, w_{Sp}\,\Phi_{\delta\sim}\sin(N\,\Omega_L t)\cos(\Omega_L t)$$

Die Spannung in der Meßspule wird vom pulsierenden Anteil des Luftspaltflusses induziert.

f) $\vartheta = \Omega_L t$, $\Omega_L = \text{const.}$

Lage der Meßspule: $\Gamma_{Sp} = 0$

Meßergebnis:

$$U_0(t) = \frac{2}{\pi} w_{Sp}\tau_p l_i \Omega_L B_\delta\left(x - \frac{\tau_p}{2}\right) - w_{Sp}\frac{d\Phi_{Sp}}{dt}$$

$$U_0(t) \approx \frac{2}{\pi} w_{Sp}\tau_p l_i \Omega_L B_\delta\left(x - \frac{\tau_p}{2}\right) + \hat{B}_{\sim} N \sin(N\,\Omega_L t)\cos(\Omega_L t)$$

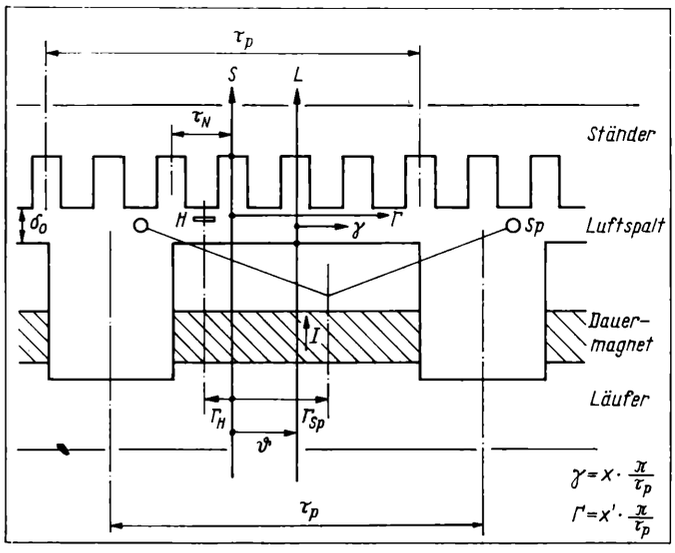
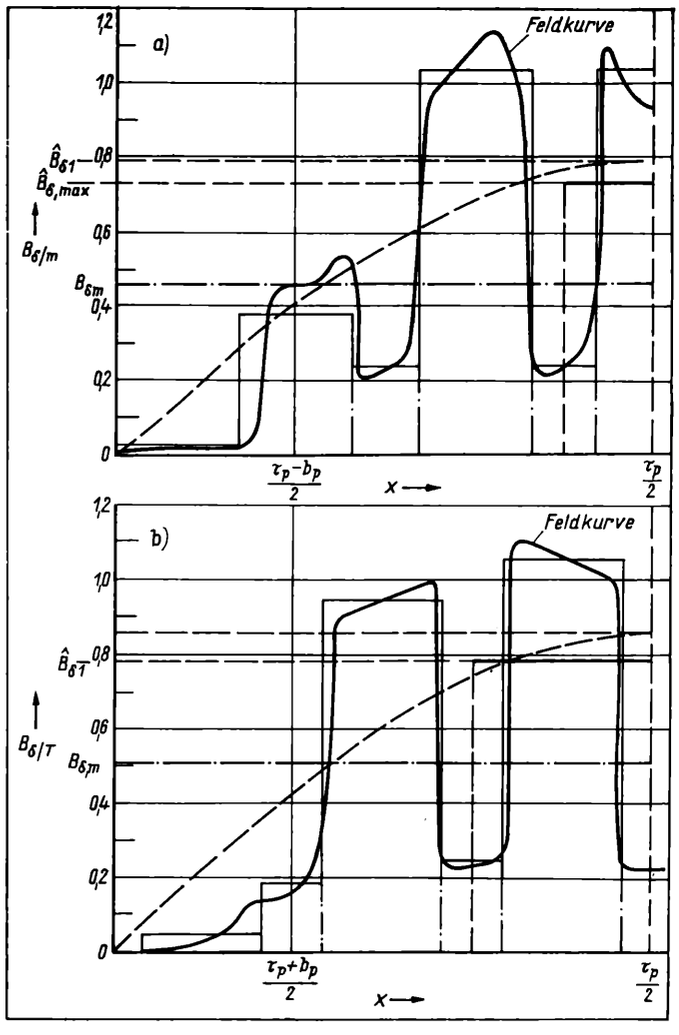


Bild 4. Ausschnitt einer dSM-Koordinaten und Lage der Meßsonden

Die in der Meßspule induzierte Spannung setzt sich aus zwei Anteilen zusammen, dem rotatorischen, der proportional der Feldkurve bei $\vartheta = 0$ ist (siehe Messung d) und einem transformatorischen, der vom pulsierenden Anteil des Luftspaltflusses verursacht wird (siehe Messung e). Sie entspricht damit nicht exakt der Feldkurve $B_\delta(x)$, ist jedoch unter Beachtung der Wicklungsfaktoren $\xi_{a,\nu}$ und der Windungszahl w_a der in der Ankerwicklung proportional.

Bild 5. Luftspaltfeldkurven bei Leerlauf einer dSM
a) Zahn in Polmitte; b) Nut in Polmitte



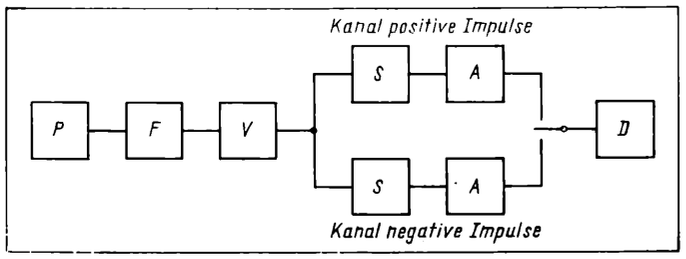


Bild 6. Signalverarbeitungskette
P Potentialtrennstufe; *F* Filterbaustein; *V* Vorverstärker, Pegelregler; *S* Selektionsschaltung; *A* Auswerteschaltung; *D* Digitale Anzeige

3. Messung der Bürstenfeuerintensität an Kommutatormaschinen

Ausgehend vom physikalischen Phänomen ist das am Bürsten/Kommutatorapparat einer Gleichstrommaschine bzw. eines Universalmotors auftretende Bürstenfeuer der von einer Folge von Kurzlichtbögen herrührende Lichtstrom. Ursache der Erscheinung ist eine elektromagnetische Fehlabstimmung der kommutierenden Spulen, die zum Zeitpunkt der Trennung des mechanischen Kontaktes zwischen der Kohlebürste und einer Kommutatorlamelle einen unkommutierten Reststrom Δi zur Folge hat. Energetisch besteht damit zum Zeitpunkt der scheinbaren Beendigung des Kommutierungsvorgangs der betrachteten Spule eine Energiedifferenz

$$W = L_{Sp} \frac{\Delta i^2}{2} \tag{3}$$

die entsprechend den gegebenen elektromagnetischen Randbedingungen über elektromagnetische Kopplung, einen dielektrischen Verschiebestrom und einen Lichtbogenstrom ausgeglichen wird. Der daraus resultierende Verschleiß der Kontaktpartner und der Funkstörpegel einer elektrischen Maschine sind wesentliche Gebrauchswerteigenschaften.
Der erosive Verschleiß der Kontaktglieder und der vom Lichtbogen ausgehende Lichtstrom sind der im Lichtbogen umgesetzten Energie proportional. Auf Grund der näherungsweise konstanten Lichtbogenbrennspannung und Spuleninduktivität besteht zwischen der im Lichtbogen umgesetzten Energie und der Lichtbogenbrenndauer ein funktioneller Zusammenhang.

$$W_{Bg} = \frac{U_{Bg}^2}{2\,L_{Sp}}\, t_{Bg}^2 \tag{4}$$

Für eine optoelektronische Erfassung der Bürstenfeuerintensität ergibt sich daraus als zweckmäßige Meßgröße die Lichtbogenbrenndauer, die integrierend über einen Beobachtungszeitraum mit einem Tastverhältnis der Impulsfolge beschrieben werden kann.

$$\nu = \frac{1}{T} \sum_0^T t_{Bg} \tag{5}$$

Der Vorteil gegenüber einer Messung des Lichtstromes besteht in der über einen größeren Bereich gegebenen Unabhängigkeit der Meßgröße t_{Bg} von der geometrischen Zuordnung zwischen optischen Sensor und Strahlungsquelle.
Bei experimentellen Untersuchungen wurde folgender Bereich dieser Meßgröße festgestellt: $10^{-6} \leqq \nu \leqq 10^{-1}$. Es zeigt sich eine gute Korrespondenz zu der in Standards festgelegten und gegenwärtig in der Prüffeldpraxis angewandten visuellen Graduierungsskale der Bürstenfeuerintensität.
Mit dem Auftreten von Lichtbögen zwischen der Bürste und einer Kommutatorlamelle verbinden sich elektromagnetische Ausgleichsvorgänge im Ankerkreis der Maschine, die zu einer charakteristischen Veränderung des Funkstörspannungspegels an den Ankerklemmen führen. Mit einer selektiv auf die vom Bürstenfeuer hervorgerufenen Störspannungsanteile abgestimmten Meßschaltung ist es möglich, aus dem der Ankerspannung überlagerten HF-Pegel eine der Bürstenfeuerintensität entsprechende Meßgröße abzuleiten. Auch hier erweist es sich als vorteilhaft, als Meßgröße die sich im Funkstörpegel abbildende Lichtbogenbrenndauer auszuwerten, da diese im Gegensatz zur Amplitude oder Spannungs-Zeitfläche kaum von der elektromagnetischen Dämpfung der induktiv gekoppelten Stromkreise der Maschine beeinflußt wird. Als Selektionskriterien wurden in der Signalverarbeitungskette nach Bild 6 die untere Grenzfrequenz, die Steilheit der aufsteigenden und abfallenden Flanken mit unterschiedlicher Wichtung, die Amplitude und Polarität des HF-Signales verwendet.

4. Verschleißmessungen am Bürsten- und Kommutatorapparat von Gleichstromkleinstmaschinen

Kommutierungsuntersuchungen an Edelmetallgleitkontakten in Gleichstromkleinstmaschinen oder an Kommutierungsmodellen zur Auswahl geeigneter Metallgleitkontaktpartner zielen insbesondere darauf ab, Kommutator- und Bürstenverschleiß meßtechnisch zu erfassen, um Gleitkontaktanordnungen hoher Lebensdauer zu projektieren.
Nicht nur gegenüber dem prinzipiellen Stromwendevorgang bei konventionellen Gleichstrommaschinen bestehen einige Besonderheiten, sondern auch in den Meß- und Prüfverfahren. Zwei derartige Meßaufgaben sollen im weiteren näher vorgestellt werden. Bild 7 (siehe 3. US) zeigt 2 Laufspuren von Metallbürsten auf einem 13 lamelligen Kommutator mit einem Durchmesser von 6,5 mm. In Bildmitte, dargestellt ist etwa der Bereich einer Lamellenteilung, befindet sich ein Kommutatorschlitz. Bild 8 (siehe 3. US) zeigt eine einfingrige, 0,7 mm breite Metallbürste mit Verschleißspuren.
Bei Abtastung der oben genannten Meßobjekte mit dem Auflichtverfahren betragen die Meßfehler für die x- und y-Koordinate etwa $\pm$ 2,4 µm, jedoch sind auch andere Verfahren bei dieser Meßeinrichtung anwendbar. Bei Anwendung dieses Prinzips muß der Kommutierungsapparat nicht vollständig demontiert werden, so daß nach den Messungen die Verschleißuntersuchungen auf einer neuen Laufspur des Kommutators fortgesetzt werden können.
Bei Verschleißmessungen an Metallbürsten, an einzelnen Lamellen des demontierten Kommutators oder an kleinen Stromwendern ohne angeschlossene Ankerwicklung bewährte sich das Tastschnittgerät „Talysurf 4".
Zum Abtasten der Oberfläche des Meßobjekts wird eine scharfe Tastnadel verwendet. Die Tastspitze ist eine vierseitige Diamantpyramide mit 90° Öffnungswinkel und einem Spitzenradius von etwa 2,5 µm. Als Bezugspunkt dient ein ebener oder ein mit einem Radius versehener Gleitschuh. Die Auf- und Abbewegungen der Tastnadel beim Meßvorgang werden durch Verwendung eines induktiven Gebers in ein elektrisches Signal umgewandelt. Mit einem Schreibgerät wird das Profil der Oberflächenunebenheiten, das auch die Verschleißspur enthält, innerhalb eines Abschnittes aufgezeichnet. Die Eichung des Gerätes erfolgt mit einem Rauheitsnormal. Der Meßfehler beträgt in jedem Meßbereich bis zu 2%.
Mit der vorgestellten Meßtechnik wurden vor allem vergleichende zeitraffende Verschleißuntersuchungen (200-h-Test) durchgeführt, um Fragen der Materialpaarungen für das Bürsten-Kommutatorsystem, der Belastbarkeit der Kontakte, der einzustellenden Bürstenkräfte aber auch die Wirkung von Kommutierungshilfsmitteln, wie die Beschaltung der Läuferspulen mit Widerständen und Kondensatoren u.a. zu klären.

5. Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden ausgehend von einigen grundsätzlichen Betrachtungen zur Meßtechnik vier praktische Probleme vorgestellt, deren Lösung sich aus der aktuellen Forschung am Objekt „Elektrische Maschine" als notwendig erwies. Dabei sollte deutlich geworden sein, wie verschiedenartig und komplex Messungen an elektrischen Maschinen sind und wie eng die Erweiterung unserer Kenntnisse mit der Entwicklung einer geeigneten Meßtechnik verbunden ist. Es sollte deshalb auch abschließend nicht unerwähnt bleiben, daß die Ergebnisse dieser Forschungsarbeiten unmittelbar in die Ausbildung der Studenten der Sektion Elektrotechnik einfließen.

Literatur

[1] Taschenbuch Betriebsmeßtechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1974
[2] *Hart, H.:* Einführung in die Meßtechnik. Berlin: VEB Verlag Technik 1979
[3] *Niebuhr, M.:* Physikalische Meßtechnik. München/Wien: R. Oldenbourg Verlag 1977
[4] *Müller, G.:* Elektrische Maschinen. Theorie elektrischer Maschinen. Berlin: VEB Verlag Technik 1974
[5] *Ermisch, J.:* Beitrag zur Konzipierung eines Meßwandlers mit optoelektronischer Meßwertübertragung für den Einsatz in Elektroenergiesystemen und in der Hochspannungsprüftechnik. Dissertation A, TU Dresden 1974
[6] *Müller, H.:* Messung elektrischer Größen bei umrichtergespeisten Drehstrommaschinen. Diplomarbeit, TU Dresden, Sektion ET, 1981
[7] *Paulig, E.:* Der Kohlebürstengleitkontakt im Elektromaschinenbau. Dissertation B, TU Dresden 1980
[8] *Schubert, P.;* u.a.: Kommutierungsuntersuchungen bei Gleichstromkleinstmaschinen. ELEKTRIE, Berlin 37 (1983) 12, S. 622 – 624

EA 5431

PERSÖNLICHES

Langjährige erfolgreiche wissenschaftliche Arbeit und Lehrtätigkeit auf dem Gebiet der Hochspannungsgerätetechnik

Zum 60. Geburtstag von NPT Prof. Dr.-Ing. habil. Werner Brendler

Ordentlicher Professor und Inhaber des Lehrstuhles für Transformatoren und Meßwandler an der Technischen Universität Dresden

Am 23. Juni 1984 vollendet Professor *Brendler* sein 60. Lebensjahr. Dieses Jubiläum gibt Anlaß, das Wirken des verdienstvollen Wissenschaftlers und Hochschullehrers zu würdigen und Rückschau zu halten auf seine persönliche Entwicklung.

Geboren im Jahr 1924 gehört Professor *Brendler* einer Generation an, deren Jugend und berufliche Entwicklung unmittelbar vom Geschehen des zweiten Weltkrieges überschattet wurde. Mit der Brechung des Bildungsprivileges eröffnete sich nach 1945 unabhängig von der sozialen Herkunft die Chance akademischer Bildung. Unter den schwierigen Bedingungen der Nachkriegszeit und des komplizierten Neubeginns der Lehr- und Forschungstätigkeit an den Universitäten und Hochschulen mußte sich diese Generation mit politischer Standfestigkeit und einem hohen Maß an Leistungsbereitschaft bewähren.

Aufgewachsen in einer Arbeiterfamilie erlernte *Werner Brendler* nach Besuch der damals obligatorischen achtklassigen Volksschule den Beruf eines Elektroinstallateurs. Sein Einstieg ins Berufsleben wurde dann durch den zweiten Weltkrieg vorerst unterbrochen. Seiner Befähigung entsprechend absolvierte er 1946/47 einen 10monatigen Vorbereitungskurs für das Hochschulstudium und konnte 1947 an der Technischen Hochschule Dresden ein Studium in der Fachrichtung Starkstromtechnik aufnehmen. Seine wissenschaftliche Befähigung wurde sehr frühzeitig durch seinen Lehrer Prof. Dr. *Ludwig Binder* erkannt und gefördert.

1952 wurde er nach bestandener Diplom-Hauptprüfung als wissenschaftlicher Assistent eingestellt. Erfolgreiche selbständige Lehr -und Forschungstätigkeit und nachgewiesene Fähigkeiten in Organisation und Leitung führten bereits nach zweijähriger Assistententätigkeit zur Ernennung zum Oberassistenten.

Seine weitere Entwicklung als Persönlichkeit und als Wissenschaftler wurde sehr wesentlich von Prof. Dr. *Kurt Pommer* beeinflußt, der 1956 die Leitung des Institutes für Elektrische Maschinen und Antriebe an der Technischen Hochschule Dresden übernahm. Nach erfolgter Berufung zum Hochschuldozenten (1962) und zum ordentlichen Professor (1967) trat er im Jahre 1968 als Direktor der im Ergebnis der III. Hochschulreform gegründeten Sektion Elektrotechnik die Nachfolge Prof. *Pommers* an.

Das wissenschaftliche Wirken Professor *Brendlers* ist auf das engste verbunden mit der Entwicklung der Hochspannungsgerätetechnik in der DDR. Sein besonderes Interesse galt von Anfang an der Meßwerterfassung, -übertragung und -verarbeitung in Elektroenergiesystemen. In seiner Dissertation (1958) sowie in seiner Habilitation (1967) befaßte er sich mit grundlegenden Untersuchungen zum elektromagnetischen Stromwandler, ein Arbeitsgebiet, dem er auch während seiner Tätigkeit in der Industrie (1958 bis 1962) treu blieb. Als Hauptkonstrukteur für den Bereich Strom- und Spannungswandler im VEB Transformatoren und Röntgenwerk „Hermann Matern" Dresden hatte er entscheidenden Anteil an der Entwicklung der zum damaligen Zeitpunkt neuartigen Generation von Mittelspannungs-Strom- und Spannungswandlern mit Epoxidharzstoffisolation und deren Überführung in die Produktion.

Kennzeichnend für sein wissenschaftliches Schaffen ist das stete Bemühen um die Einheit der Entwicklung von Werkstoffanwendung, Konstruktion und Technologie und die auf Vorlauf orientierte Suche nach neuen physikalischen Wirkprinzipien für die Gestaltung der Erzeugnisse. Erfolgreiche wissenschaftliche Arbeit leistete er mit seinem Kollektiv auch auf dem Gebiet des Transformatorenbaus. Die durchgeführten analytischen und experimentellen Untersuchungen zur Vorausbestimmung und Verringerung der Zusatzverluste in Transformatoren waren wesentlicher Ausgangspunkt für die Entwicklung einer neuen Generation von Großtransformatoren.

Zahlreiche Veröffentlichungen und Patente zeugen von der Kreativität seiner Ingenieurtätigkeit. Die unter seiner Anleitung durchgeführten Forschungsarbeiten und abgeschlossenen Dissertationen zeigen seinen wissenschaftlichen Weitblick und sein stetes Bemühen um die Heranbildung und Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Die Würdigung Professor *Brendlers* bliebe unvollkommen, wenn nicht die umfangreiche kontinuierliche Tätigkeit des Jubilars in wissenschaftlichen Gremien, in der Erfüllung ehrenvoller Berufungen zur Vorbereitung und Durchsetzung wissenschafts- und hochschulpolitischer Entscheidungen und in der Gestaltung effektiver Partnerschaftsbeziehungen zwischen den Hochschulen und der Industrie hervorgehoben wird, die seine breite wissenschaftliche Ausstrahlungskraft in hohem Maße repräsentiert.

Mit den ihm verliehenen hohen staatlichen Auszeichnungen und zuteil gewordenen Ehrungen fand sein erfolgreiches Wirken als Hochschullehrer und Wissenschaftler hohe Anerkennung. Der hohen Wertschätzung seiner Persönlichkeit durch seine Kollegen, Mitarbeiter und Schüler gewiß gelten ihm zu seinem 60. Geburtstag die besten Wünsche für viele weitere Jahre geistiger Schaffenskraft und körperlichen Wohlbefindens.

E. Paulig, Dresden EA 5430

FACHTAGUNGEN

Energie — Entwicklung — Lebensqualität

Ergebnisse des 12. Kongresses der Weltenergiekonferenz 1983 in New Delhi

Der 12. Kongreß der Weltenergiekonferenz fand vom 18 bis 23. September 1983 in New Delhi statt. An diesem Kongreß nehmen etwa 3000 Delegierte aus 70 Ländern und von 26 internationalen Organisationen teil, darunter auch eine Delegation aus der DDR.

Bereits am 14. Dezember 1983 führte das Nationalkomitee der DDR eine nationale Auswertungstagung mit Fachexperten aus allen einschlägigen Industriezweigen durch. Ziel dieser Tagung war es, einen breiten Kreis von interessierten Fachexperten unmittelbar mit den wichtigsten Kongreßergebnissen vertraut zu machen, Anregungen für die tiefere Auswertung des Kongreßmaterials zu geben und Schlußfolgerungen für die eigene Arbeit aus den sich abzeichnenden Weltentwicklungstrends zu ziehen.

Gegenwärtig wird das Konferenzmaterial weiter ausgewertet, zum Teil auch übersetzt und steht interessierten Fachkollegen und Institutionen beim IfE/ZRE bzw. über das Sektretariat des Nationalkomitees der DDR in der WEC, 7024 Leipzig, Torgauer Str. 114, zur Verfügung.

Mit der folgenden Auswertung des 12. Kongresses der WEC wollen wir allgemein informieren, unter Berücksichtigung einiger spezifischer Ergebnisse, die auf den Leserkreis der Fachzeitschrift ELEKTRIE zugeschnitten sind.

Allgemeine Ergebnisse

Dem Thema der Konferenz entsprechend waren die eingereichten 160 Konferenzberichte sowie alle diskutierten Fragen auf die Lösung der gegenwärtigen und auch künftigen Energieprobleme ausgerichtet, unter Beachtung des technischen Fortschritts, der Lebensqualität und der besonderen Situation in den Entwicklungsländern.

Dabei gab es folgende Schwerpunkte:

- Entwicklung und Anwendung neuer Technologien
- Erreichung eines hohen Grades der Energieversorgung auf Basis eigener Ressourcen
- Verbreiterung der verfügbaren Energiebasis
- Reduzierung der Abhängigkeit vom Öl
- Verbesserung der Effektivität und Rationalisierung der Energieverwendung
- Internationale Kooperation und Entwicklungshilfe
- Der Einfluß der Energie auf Lebensstandard und Umwelt.

Es fand ein breiter Erfahrungsaustausch statt zu verschiedenen technischen und ökonomischen Problemen der Energiewirtschaft, wobei Strategiefragen zur Lösung der weltweiten Energieprobleme im Mittelpunkt standen.

Für die meisten Länder lassen sich 4 Hauptrichtungen in der Energiepolitik ableiten:

1. Der effektive und sparsame Umgang mit Energie wurde als Aufgabenkomplex von

hervorragender Bedeutung herausgestellt, der in allen Bereichen der Wirtschaft und des sozialen Lebens durchgesetzt werden muß. Beachtliche Fortschritte wurden bezüglich der Energieeinsparung in einigen Schlüsselindustrien erreicht. Der spezifische Energieverbrauch konnte bei diesen Produkten in den letzten Jahren um 10 bis 30% gesenkt werden. Für die Raumheizung werden bei vorhandenen Gebäuden Energieeinsparungsmöglichkeiten in Höhe von 30% gesehen, die sich bei neu zu errichtenden Gebäuden auf etwa 50% erhöhen lassen.

2. Die maximale Nutzung eigener Energieressourcen und die Sicherstellung der Selbstversorgung hat einen hohen Stellenwert erhalten. Dabei stehen die verstärkte Suche und Erschließung der eigenen Ressourcen (Erdöl und Erdgas) sowie die volle Nutzung des verfügbaren Wasserkraftpotentials, der Kohle, der Kernenergie sowie alternative Energiequellen im Vordergrund. Auch die Entwicklung eigener Technologien zur Energieerzeugung und zur Herstellung von Energieausrüstungen sind bei einer Reihe von Entwicklungsländern darin eingeschlossen, um ein hohes Maß an Unabhängigkeit auf diesen Gebieten zu erreichen.
3. Der vielseitige Ausbau der Energieversorgung wird von vielen Ländern als wichtige energiepolitische Maßnahme verfolgt, um eine einseitige Abhängigkeit von einem Energieträger zu überwinden und die Versorgungssicherheit des Landes zu erhöhen. Die Entwicklung der Kohle, der Kernenergie und der alternativen und regenerierbaren Energiequellen wurde allgemein betont.
4. Die Substitution von Erdöl wurde insbesondere in den letzten Jahren stark forciert. Ein speziell dazu vorgelegter Bericht der WEC sagt aus, daß der Anteil des Öls am Weltenergiebedarf von 46% (1973) auf 40% (1982) gesunken ist und daß dieser Anteil in den nächsten Jahren nur langsam weiter sinken wird. Trotz Verringerung des Anteils des Erdöls am Gesamtenergieverbrauch ist der absolute Verbrauch von 2,24 Mrd. t (1973) auf 2,38 Mrd. t (1982) gestiegen.

Einige Ergebnisse aus den Berichten und Diskussionen

Zur Sicherung des Energiebedarfs der Länder werden die künftigen Einsatzstrategien für Energieträger jetzt weltweit überdacht mit der Zielstellung, langfristige Sicherung des Energiebedarfs, Senkung der Ölimporte und in zunehmendem Maße Nutzung alternativer Energiequellen. Der Erschließung und Nutzung eigener Energieressourcen für die Energiebedarfsdeckung wird heute überall eine Priorität eingeräumt. Für die angelaufenen Substitutionsprozesse (vor allem bei Öl) spielt Kohle eine herausragende Rolle.

Kohle

Nach den vorgelegten Berichten können bis zum Jahre 2000 etwa 30 bis 40% des Gesamtenergieverbrauches der Welt durch Kohle gedeckt werden. Die heute bekannten Kohlevorräte reichen auf der Basis des derzeitigen Produktionsniveaus noch für mehr als 200 Jahre aus. Optimistische Einschätzungen rechnen sogar bis zu 400 Jahren. Die internationale Tendenz geht eindeutig in die Richtung auch ballasthaltige, heizwertarme Kohle in großem Umfang zu nutzen. Haupteinsatzgebiete für die Kohle sind und werden bleiben.

- die Elektroenergieerzeugung (trotz der Entwicklung bei Kernkraftwerken)
- energieintensive Produktionsprozesse, wie Stahlerzeugung, Zementindustrie
- Synthesegaserzeugung
- Flüssigproduktengewinnung.

Als progressive und zukunftsträchtige Anwendungstechnologien für Kohle werden Verfahren der Wirbelschichtverbrennung, der Flugstromvergasung sowie der Kohleverflüssigung angesehen. Auf diesen Gebieten werden in verschiedenen Ländern Entwicklungen vorangetrieben und zum Teil auch bereits technische Anlagen betrieben.

Erdöl und Erdgas

Die Ressourcen für Erdöl und Erdgas sind ebenfalls beachtlich. Bei einer gegenwärtigen Welt-Ölförderung von etwa 3 Mrd t/a und einer Welt-Erdgasförderung von 1600 Mrd m^3/a ist mit den jetzt bekannten und sicher gewinnbaren Ressourcen an Erdöl (etwa 89 Mrd t) und an Erdgas (etwa 82000 Mrd m^3) der Weltbedarf für die nächsten 30 Jahre bzw. 45 Jahre bei einem vorausgesetzten etwa konstanten Verbrauch an diesen Energieträgern und Rohstoffen gesichert.

Der gegenwärtige Anteil des Öls am Weltenergieverbrauch ist von 46% 1973 auf 40% 1982 gesunken, wird aber in den nächsten Jahren nur langsam weiter fallen.

Bei Erdgas wird die Versorgungssituation langzeitig als wesentlich günstiger eingeschätzt. Der Erdgasanteil am Weltenergieverbrauch liegt z.Z. bei etwas über 17%. In Ländern wie der UdSSR und den USA erreicht er 27%.

Die weltweiten Entwicklungsarbeiten sind auf verbesserte Erkundungs- und Erschließungstechnologien ausgerichtet mit Schwerpunkt auf die Shelfgebiete und die noch wenig erschlossenen Regionen unserer Erde. Hier werden noch beachtliche Ressourcen vermutet.

Ölschiefer und Teersande

Die bedeutenden Reserven in diesen Energie- und Rohstoffressourcen spielen für die Zukunft eine große Rolle. An der Entwicklung wirtschaftlicher Gewinnungs- und Verarbeitungstechnologien wird gearbeitet, z.Z. erfolgt vorwiegend eine Verfeuerung. Verarbeitungstechnologien in Richtung Ölgewinnung werden entwickelt, sind heute aber noch nicht konkurrenzfähig.

Regenerierbare Energieressourcen

Die Bedeutung der regenerierbaren Energieressourcen, wie Windkraft, Wasserkraft, Gezeiten- und Wellenenergie, Sonnenenergie, Geothermie und Biomasse werden für die Energiebereitstellung eines Landes z.T. recht unterschiedlich bewertet. Dabei spielen geografische Lage, Klima sowie der wirtschaftlich-technische Entwicklungsstand eine entscheidende Rolle.

Im Jahre 2000 sollen durch regenerierbare Energieressourcen 0,25 Mrd. t Einheitsbrennstoff und im Jahre 2020 bereits 2,6 Mrd. t Einheitsbrennstoff weltweit ersetzt werden. Das würde an der Gesamtenergieerzeugung der Welt einem Anteil von 1,4% bzw. 8,7% entsprechen. In den USA erwartet man im Jahre 2000 einen Dekkungsanteil am Gesamtenergieverbrauch durch Wasserkraft und Geothermie von 4,8 bis 11%.

Das technisch und ökonomisch nutzbare Wasserkraftpotential der Welt wird mit 10000 TWh eingeschätzt. Von diesem Potential liegen etwa 48% in den Entwicklungsländern. Nur etwa 16% des Gesamtpotentials werden gegenwärtig genutzt, wobei der Ausnutzungsgrad in den Entwicklungsländern nur bei 7% liegt. Die Tendenz geht vor allem in den Entwicklungsländern zum breiteren Einsatz von kleineren Wasserkraftanlagen.

Die Windenergie für die Welt mit einem Äquivalent von $56{,}3 \cdot 10^9$ t Einheitsbrennstoff veranschlagt. Als mögliche summarische Leistung aller Windkraftwerke der Welt werden $5 \cdot 10^6$ MW eingeschätzt. Obwohl es viele technische Probleme noch zu lösen gilt, sind in den letzten Jahren doch sichtbare Fortschritte auf diesem Gebiet gemacht worden. So wollen z.B. die Niederlande im Jahre 2000 etwa 5 bis 10% ihres Elektroenergiebedarfes durch Windenergie decken.

Die Nutzung der Sonnenenergie wird entsprechend der geografischen Lage unterschiedlich bewertet. Die durchschnittliche Einstrahlungsintensität wird mit 250 W/m^2 bzw. auch 1000 W/m^2 in günstigen Regionen angesetzt. An verschiedenen Modifikationen von Sonnenkraftwerken, Sonnenbatterien und anderen technischen Lösungen wird gearbeitet. Der Sonnenenergie wird von einigen Ländern vor allem Bedeutung für die Warmwasserbereitung, die Raumheizung, die Klimatisierung und auch für die Wasserentsalzung zugeschrieben.

Die auf der Welt erzeugbare Biomasse entspricht einem gebundenen Kohlenstoff von 47 Mrd. t zuzüglich 25 Mrd. t in den Weltmeeren. 45% des jährlichen Anfalls an Biomasse basieren auf Wald- und Buschland. Feuerholz und andere Arten von Biomasse bilden einen großen Anteil des Energieverbrauchs in Entwicklungsländern. Indien verbraucht zum Beispiel über 40% seiner gesamten Energie in Form von Biomassen und China annähernd 25%. Daher sind die Wirkungen des anwachsenden Verbrauchs an Biomasse sowohl auf nationaler als auch auf globaler Ebene von besonderer Bedeutung für die Entwicklungsländer. Der damit einhergehenden Entwaldung soll stärker als bisher entgegengewirkt werden, um Wüstenbildung und ungünstige klimatische Entwicklungen zu vermeiden. Gleichzeitig kann aber die Sonnenenergie über schnellwüchsige Pflanzen relativ günstig für die Energieversorgung genutzt werden, wodurch den Biomassen unter verschiedenen Aspekten große Bedeutung zugemessen wird.

Aus der Erdwärme lassen sich etwa $2 \cdot 10^{14}$ kWh gewinnen. Auf diesem Gebiet gibt es in einigen Ländern bereits einen fortgeschrittenen Stand, und es wird recht umfassend an der technischen Entwicklung gearbeitet. Gegenwärtig sind etwa 2000 MW Leistung in geothermischen Kraftwerken installiert, und die Wärmegewinnung aus der Geothermie beträgt rd. 10000 MW. Die Schaffung von Wärmeaustauschsystemen

im Untergrund durch Anlegen von Tiefbohrungen und von Großfracse im Gestein sind wichtige Probleme, die für eine intensivere Nutzung gelöst werden müssen.
Die Energieressourcen, die in der Wellen-, Tiden-, Meereswärme und Meeresströmungsenergie stecken, sind ebenfalls beachtlich, spielen aber nur in günstig gelegenen Regionen eine nennenswerte Rolle.

Elektroenergie

Bei der Diskussion um den Ausbau der Elektroenergiesysteme ging es hauptsächlich um eine Verbreiterung der Erzeugungstechnologien und die breitere Anwendung der Elektroenergie. Obwohl ihr Anteil in der Weltenergiebilanz relativ gemäßigt erscheint, ist doch eine langsame aber stetige Erhöhung zu verzeichnen. Es wird allgemein eingeschätzt, daß die Elektroenergie unmittelbar auf die Entwicklung von Schlüsselindustrien, wie die Mikroelektronik und die Nutzung neuester Technologien, von entscheidendem Einfluß ist.
Bei konventionellen Kraftwerken werden Fragen des Umweltschutzes bei entsprechenden technischen und ökonomischen Aufwendungen als lösbar eingeschätzt. Die Nutzung der Kernenergie gewinnt weltweit ständig an Bedeutung. Ihr Anteil an der Gesamtelektroenergieerzeugung liegt bei etwa 19 % und steigt weiter an. Kernkraftwerke im Leistungsbereich 600 bis 1200 MWe werden als beträchtlich kostengünstiger gegenüber Öl- und Kohlekraftwerken eingeschätzt. Anlagengrößen zwischen 200 bis 400 MWe werden als besonders kostengünstig, vor allem für die Entwicklungsländer, herausgestellt.
1982 waren weltweit Kernkraftwerkleistungen von insgesamt mehr als 173 GW in Betrieb.
In der Wärme-Kraft-Kopplung spielen Kernkraftwerke eine zunehmende Rolle. Nukleare Fernheizanlagen werden jetzt in der UdSSR (Gorki und Woronesh) aufgebaut mit Einheitskapazitäten von 3600 GJh.

Von der UdSSR wurde weiter über ein sich in der Konstruktionsphase befindliches Kernkraftwerk mit einem 800 bis 1600 MW schnellen Neutronenreaktor berichtet.
Die Arbeiten am Problem der thermonuklearen Fusion werden in Zusammenarbeit von einer Reihe von Ländern betrieben. Eine kommerzielle Nutzung wird jedoch nicht mehr in diesem Jahrhundert erwartet. Für den Elektroenergietransport werden die bereits bestehenden großen Verbundsysteme weiter ausgebaut mit künftigen Übertragungsspannungen von 1800 bis 2000 kV. Die dafür zu lösenden Probleme in Forschung und Entwicklung werden als schwierig aber lösbar eingeschätzt.

Zusammenfassung

Der 12. Kongreß der Weltenergiekonferenz wurde maßgeblich durch die energiepolitische Lage in der Welt geprägt. Während in den entwickelten kapitalistischen Ländern Überangebote und Überkapazitäten in der Brennstoff- und Energiewirtschaft zu verzeichnen sind, können die Entwicklungsländer oft nicht den dringendsten Energiebedarf für die Grundbedürfnisse ihrer Bevölkerung decken, wobei die steigenden Roh- und Brennstoffpreise diese Situation noch weiter verschärfen. Eine Hilfe für diese Länder wird als dringend notwendig eingeschätzt. Dabei stehen die finanzielle und materielle Unterstützung, die Zusammenarbeit auf technologischem Gebiet, die Qualifizierung von Fachkräften sowie der Informationsaustausch im Vordergrund.
Für die künftige Sicherung der Energiebereitstellung wird der Kohle eine Spitzenposition eingeräumt. Erdöl und Erdgas werden zwar noch für eine Reihe von Jahren auch in großen Mengen verfügbar sein, ihr Einsatzbereich verschiebt sich aber sehr deutlich in Richtung einer Nutzung als Rohstoff. Außerdem sollte insbesondere Öl zur Befriedigung der dringendsten energietischen Bedürfnisse der Entwicklungsländer verfügbar bleiben.
Bedarf und Erzeugung von Elektroenergie werden sich nach den vorgelegten Prognosen im Durchschnitt schneller entwickeln als die übrigen Energieträger. Gründe dafür werden einmal darin gesehen, daß sich Elektroenergie praktisch aus allen fossilen Brennstoffen, unter Nutzung der regenerierbaren Energieressourcen und aus Kernbrennstoffen herstellen läßt, und darüber hinaus am universellsten und umweltfreundlichsten anwenden läßt. Beim heutigen Stand der Technik beeinflußt Elektroenergie von allen Energieträgern am maßgeblichsten die Lebensqualität für den Menschen.
Bei den regenerierbaren Energieressourcen gibt es unterschiedliche Einschätzungen über deren Bedeutung für die nationale Energiebereitstellung, abhängig von der geografischen Lage, dem Klima, dem Stand der Technik und anderen Einflußfaktoren. Es zeichnet sich aber ab, daß sowohl Wasserkraft, Wind- und Sonnenenergie sowie Geothermie und Biomassen vor allem in den Entwicklungsländern in den nächsten Jahren eine wachsende Rolle für die Energiebereitstellung spielen werden.
Die Erkenntnis, daß ein bewußter und sparsamer Umgang mit den verfügbaren Energieressourcen sowie ein wirksamer Umweltschutz für die gesamte Menschheit ein Gebot der Vernunft ist, beginnt sich mehr und mehr durchzusetzen. Neue technologische Entwicklungen sind heute allgemein auf dieses Ziel ausgerichtet und haben in den letzten Jahren zu Erfolgen geführt, die jetzt konsequent weiter verfolgt werden sollen.

M. Pustal, Leipzig EA 1704

Aktuelle Probleme elektrischer Bahnen

Am 8. und 9. Dezember 1983 fand zu o.g. Problematik eine gemeinsam von der HfV Dresden, Sektion Fahrzeugtechnik, dem FUA „Elektrische Bahnen" und dem FA Stromversorgung und Fahrleitungen der KDT organisierte Fachtagung in Leipzig statt. Auf dieser Fachtagung (200 Teilnehmer) hatten alle im Bereich der elektrischen Zugförderung tätigen Fachkollegen die Möglichkeit, sich mit den neuesten wissenschaftlich-technischen Erkenntnissen für das Errichten, Betreiben und Instandhalten von Fahrzeugen und ortsfesten Anlagen der elektrischen Zugförderung vertraut zu machen.

Das Hauptreferat hielt der Leiter der Hauptabteilung Elektrifizierung der DR, Reichsbahnoberdirektor Dipl.-Ing. *Hahn* zum Thema: „Die Streckenelektrifizierung der DR — ein wichtiges Rationalisierungsvorhaben unserer Republik".
Prof. Dr.-Ing. *Schulze* (HfV Dresden) berichtete über die Auslegung von Drehstromasynchron-Fahrmotoren bei Stromeinprägung.
Doz. Dr.-Ing. *Kahler* (HfV Dresden) begründete die Notwendigkeit, elektrische Lokomotiven mit Drehstromantriebstechnik im Leistungsbereich von etwa 1000 kW zu entwickeln, die sowohl im Rangier- als auch im leichten Zugdienst eingesetzt werden können.
Dr.-Ing. *Dreßler* (ZFIV, IfE, Sektion 3) erläuterte die Ergebnisse einer von ihm vorgenommenen Kabeldimensionierung von dezentralen Umformerwerken der DR auf der Basis eines an der HfV Dresden gemeinsam mit dem ZFIV erarbeiteten stochastischen Dimensionierungsverfahrens. Die Ergebnisse der vorgestellten Arbeit werden durch den Werkstandard der DR
DR-M 20.—30.002 bereits praxiswirksam.
Dipl.-Ing. *Albrecht* (VEB Energiebau Radebeul, BT Berlin) stellte die Automatisierungskonzeption von 50-Hz-/ 16 2/3-Hz-Umformerwerken der DR vor, die ab dUfw Bützow realisiert werden soll.
Dipl.-Ing. *Radig* (KLEW „Hans Beimler" Hennigsdorf) machte die Anwesenden mit den neuen 50-Hz-Industrielokomotivgespannen EL 20, die für die UdSSR entwickelt wurden, bekannt. Die Gespanne EL 20 bestehen aus einer 50-Hz-Industrielokomotive mit zusätzlichem Dieselantrieb und 2 Motorkippwagen. Diese Dieselanlage wurde neu konzipiert unter Einsatz des Dieselmotors 12 KVD 21 AL 4. Die Fahrmotorleistung wurde durch Einsatz der WBK „F" auf 460 kW erhöht. Das Gespann erreicht eine Gesamtleistung bei Fahrdrahtbetrieb von 5520 kW, kurzzeitig 6600 kW. Die Lokomotive hat Thyristorgleichrichter in halbgesteuerter Brückenschaltung und Folgesteuerung. Die Einstellung der Zugkraft ist stufenlos möglich.
Dipl.-Ing. *B. Müller* (ZFIV, IfE, Sektion 3) machte auf Probleme des Gemeinschaftsbetriebes von 750-V-Gleichstrombahn (Berliner S-Bahn) und Einphasenwechselstrombahn mit einer Frequenz von 16 2/3 Hz aufmerksam. Besonders störend auf den Betrieb der Einphasenwechselstrombahn wirkt von der S-Bahn in die Fernbahngleise übertretender Triebrückstrom, wenn er über die Hauptstromkreise von Ws-Triebfahrzeugen und die Oberleitungen bis zum Ws-Unterwerk fließt. Durch strenge galvanische Trennung beider Rückleitungssysteme wird die Höhe des in den Ws-Gleisen fließenden Gleichstrom sehr stark begrenzt. Alle baulichen und betrieblichen Maßnahmen müssen diese galvanische Trennung beachten und erhalten. Besondere Probleme treten noch auf beim Schutz der S-Bahn im Falle des Oberleitungsrisses.
Dipl.-Ing. *Dolniczek* (Bahnstromwerk Magdeburg der DR) sprach über das Betreiben von Fahrleitungsanlagen von Einphasenwechselstrombahnen und ging dabei speziell auf die neu erarbeitete Dienstvorschrift 462 der DR, die den Dienst auf Strecken mit elektrischer Zugförderung regelt, ein.

Ing. *Eisenhuth* (VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin) informierte über inhaltliche Fragen der neuen Fassung der TGL 200-0632 „Elektrotechnische Anlagen für Bahnen", zu denen auch in der Fachpresse bereits Aussagen getroffen wurden.

Im Vortrag von Dr.-Ing. *Brohm* (Ingenieurschule für Verkehrstechnik Dresden) „Elektrosicherheit bei elektrischen Bahnen" wurden der Öffentlichkeit wesentliche Versuchsergebnisse über die Einbeziehung von Stahlbetonbauwerken, die über elektrifizierte Eisenbahnlinien führen, in die Schutzmaßnahmen gegen indirektes Berühren vorgestellt. Der Autor schlußfolgerte, daß die Forderung nach Einbeziehung der Stahlbewehrung von Stahlbetonbauwerken in die Erdungsmaßnahmen nicht gerechtfertigt ist. Durch Änderung der neuesten Ausgabe der TGL 200-0632/03 sind bei merklicher Erhöhung der Elektrosicherheit beachtliche Mitteleinsparungen möglich.

„Ein neuer Vorschlag für eine Einrichtung zur Unterscheidung von Betriebs- und Kurzschlußströmen" wurde von Dr.-Ing. *S. Heide* (ZFIV, IfE, Sektion 3) unterbreitet. Leistungsstarke Triebfahrzeuge und eine allgemein hohe Streckenbelastung führen zu Einspeiseströmen im Unterwerk, die größer sein können als kleine Kurzschlußströme. Zur sicheren Betriebsführung ist deshalb eine Unterscheidung zwischen Betriebs- und Kurzschlußströmen notwendig. Um ein Unterscheidungskriterium zu gewinnen, wird vorgeschlagen, die Sammelschienenspannung auszuwerten. Beim Auftreten hoher Betriebsströme wird die speisende Spannung nachgeregelt, so daß Spannungseinbrüche im Betriebsfall nicht auftreten oder mit einer so geringen Änderungsgeschwindigkeit dU/dt erfolgen, daß eine sichere Unterscheidung zum Kurzschlußfall möglich ist. Diese Änderungsgeschwindigkeit wird vom dU/dt-Relais erfaßt. Ein fehlerhaftes Ansprechen beim sprunghaften Ansteigen der Sammelschienenspannung infolge Lastabwurfes wird vermieden, wenn nur eine negative Änderung der Sammelschienenspannung als Kurzschlußkriterium verwendet wird.

Doz. Dr.-Ing. *P. Schmidt* (HfV Dresden) analysierte Einflußgrößen des Bahnbetriebes auf die Bemessung von Energieversorgungsanlagen elektrischer Bahnen basierend auf betriebsstatistischen Untersuchungen, Ferner gab er Kriterien zur Bewertung der betrieblichen Leistungsfähigkeit bei verschiedenen Arten von Havarien an Bahnenergieversorgungsanlagen an.

Doz. Dr. sc. techn. *Zimmert* (ZFIV, IfE, Sektion 3) sprach anschließend über die energiewirtschaftliche Betriebsführung von dezentralen Umformerwerken der DR. Er unterbreitete den Vorschlag, in Nutzung der Kenntnis des Jahresganges der Bahnbelastung und durch stochastisches Bemessen der Umformerwerke einen maximal häufigen Betrieb im Bereich des günstigsten Umformerwirkungsgrades durchzuführen.

Bei besserer Auslastung der Betriebsmittel sind dabei jährliche Energieeinsparungen von über 1 GWh je dUfw möglich.

Dr.-Ing. *G. Hofmann* (HfV Dresden) erläuterte die Anwendung der EDV bei der Berechnung des Energiebedarfes im Straßenbahnbetrieb, dargestellt anhand des Beispiels der Verkehrsbetriebe Dresden. Ausgehend von der Energiebedarfsermittlung der im Straßenbahnnetz fahrenden Züge ermöglicht es das EDV-Projekt, die Belastungsverhältnisse in den Speiseabschnitten und Unterwerken einzuschätzen. Damit lassen sich vor allem bei Fahrplanänderungen und Umleitungsverkehr wichtige Aussagen für die Betriebsführung der Energieversorgungsanlagen der Straßenbahn ableiten.

Ing. *Lement* (Leipziger Verkehrsbetriebe) hielt ein Kurzreferat zum neuentwickelten Turmwagen auf der Basis des Fahrzeuges W 50 L/L (Spezialpritsche mit Ladearm) mit Hydraulik-Knick-Ausleger, wodurch u.a. eine Ausfahrhöhe der Montagebühne bis 5,60 m Fußbodenhöhe erreicht wird. Die Arbeitsbühne erlaubt ein Arbeiten unter Spannung. Obering. Dipl.-Ing.-Ök. *Quaas* (VEB Kombinat Verkehrsbetriebe der Stadt Dresden) stellte die Energiedispatcherzentrale für die Energieversorgung der Straßenbahn der Verkehrsbetriebe Dresden vor.

Dr.-Ing. *Hellige* (HfV Dresden, Sektion Fahrzeugtechnik) sprach über „Energieverbrauchsnormen — Untersuchungen und Probleme". Ungünstig wirkt sich bei der Aufstellung von Normen vor allem die große Anzahl von Einflußfaktoren auf den Energieverbrauch aus, die in den einzelnen Verkehrsbetrieben oder auch auf einzelnen Linien eines Betriebes recht unterschiedlich sein können. Dipl.-Ing. *Preiß* (VEB Kombinat Verkehrsbetriebe der Stadt Leipzig) informierte über den Wendezugbetrieb — ein Rationalisierungsmittel im Straßenbahnverkehr.

Der Vortrag von Dipl.-Ing. *Löcke* und Dipl.-Ing. *Wanke* (VEB Kombinat Berliner Verkehrsbetriebe) war den Energieversorgungs- und Fahrleitungsanlagen der Neubau-Straßenbahnstrecke Marzahn in der Hauptstadt der DDR gewidmet.

Mit großem Interesse wurde der Vortrag von Dr.-Ing. *Nikoloff* (VEB KLEW „Hans Beimler" Hennigsdorf), Dipl.-Ing. *Driebe* (DR, Verwaltung S-Bahn) und Dr.-Ing. *Scherz* (ZFIV, IfE, Sektion 4) über Erkenntnisse aus der Prüfung und Erprobung der Triebzüge BR 270 der Berliner S-Bahn aufgenommen. Gegenüber den herkömmlichen S-Bahn-Fahrzeugen können 27% bis 30% Elektroenergie eingespart werden, wie die dazu ausgeführten Messungen belegen.

Dipl.-Ing. *Sittnik* (VEB Elektroprojekt und Anlagenbau Berlin) machte die Fachkollegen mit neuen Problemlösungen in Gleichrichter-Unterwerken durch breitere Anwendung der Leistungs- und Mikroelektronik bekannt. Er nannte die 12-Puls-Schaltung als Möglichkeit zur Verbesserung des Wirkungsgrades. Ab 1984 werden die Gleichspannungs-Schaltanlagen mit Lichtbogenwächter ausgestattet. Über die Konzeption und Erprobungsergebnisse der elektrischen Lokomotive der Baureihe 212/243 der DR berichtete Dipl.-Ing. *Seyfarth*, VEB KLEW „Hans Beimler" Hennigsdorf.

Abschließend analysierte Dr.-Ing. *Schäfer* (Ingenieurschule für Verkehrstechnik Dresden) Leistungssteuerungseinrichtungen elektrischer Triebfahrzeuge bei verschiedenen Systemen der elektrischen Zugförderung.

Einer begonnenen Tradition folgend soll in drei bis vier Jahren der Erfahrungsaustausch im Bereich der elektrischen Zugförderung auch in dieser Form weitergeführt werden.

P. Schmidt, Dresden EA 1711

Angewandte numerische Magnetfeldberechnung

KARL-MARX-STADT TH

1. Wintertagung der Sektion Automatisierungstechnik der TH Karl-Marx-Stadt[1]) vom 15. bis 17. Februar 1984

In seinem Einführungsvortrag umriß Prof. *P.-K. Budig* die Zielstellung dieser erstmalig durchgeführten Tagung

- Vorstellung anwenderorientierter Software zur Berechnung magnetischer Felder in elektromagnetischen Energiewandlern
- Erfahrungsaustausch zur Optimierung der rechenzeitaufwendigen Lösungsprogramme der nichtlinearen Magnetfeldgleichungen
- Auswertung der ermittelten Feldverteilungen hinsichtlich für den Berechner elektrischer Maschinen interessanter integraler Feldgrößen
- Diskussion mit potentiellen Nutzern der vorhandenen Programmpakete über weitere Einsatzmöglichkeiten und Entwicklungsforderungen.

Gestiegene Anforderungen sowohl an Materialökonomie elektromagnetischer Energiewandler, insbesondere rotierender elektrischer Maschinen, als auch an den dabei erzielbaren Wirkungsgrad erfordern aussagefähige und genaue Berechnungsverfahren für den Entwurf und die Nachrechnung. Die dabei auftretenden und mit konventionellen Mitteln der Berechnung elektromagnetischer Energiewandler z.T. nur schwer zu berechnenden Probleme wurden in [1] angedeutet. Ausgehend von diesen Problemstellungen wurden die notwendigen Voraussetzungen und Vereinfachungen dargestellt [2], die zu treffen sind, bevor das zu behandelnde Magnetkreisproblem geeignet diskretisiert und mit numerischen Verfahren gelöst werden kann [3] [4]. Dafür kann das Programmpaket FELD [5] mit zugehörigen Programmkomponenten zur Auswertung des ermittelten Magnetfeldverlaufes [6] der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt genutzt werden. Die Anwendung dieser Programmpakete für stationäre Magnetfelder auf eine kleine Wechselstromreihenschlußmaschine unterstrich insbesondere den Nutzen derartiger Berechnungsverfahren, der aus hohen Kosteneinsparungen beim Musterbau resultiert [7]. Nach einem Übersichtsvortrag zur numerischen Magnetfeldberechnung an der Technischen Universität Dresden [8] erfolgt die Vorstellung des dort entwickelten Programmpaketes MFD, welches ebenfalls der Berechnung stationärer Magnetfelder dient [9]. Auch dieses Programmpaket kann für Nutzrechnungen verwendet werden. Es muß hierbei die enge Zusammenarbeit zwischen der Technischen Universität Dresden und der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt hervorgehoben werden, die sich fördernd auf die Entwicklung und Verbesserung beider Programmpakete auswirkt und zur Erhöhung der Effektivität der Forschung beider Einrichtungen auf dem Gebiet der

[1]) Einige ausgewählte Beiträge der ersten Wintertagung „Angewandte numerische Magnetfeldberechnung" werden in ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) Heft 7 erscheinen.

numerischen Magnetfeldberechnung beiträgt.

Neben den auf der Basis des Differenzverfahrens entstandenen Programmpaketen wurden Lösungsverfahren mit der Methode der finiten Elemente [10] [11] und mit Spiegelungs- und Netzwerkmethoden [12] vorgestellt.

In der Diskussion und während eines Rundtischgespräches wurden die industrielle Anwendbarkeit der vorhandenen Programmpakete unterstrichen sowie Richtlinien zur Weiterführung der Arbeiten aufgestellt

- Reduzierung des Aufwandes bei der Eingabe der Magnetkreisgeometrien im Hinblick auf eine automatische Eingabetechnik
- Anwendung von Diskretisierungsnetzen, die sich besser an technisch realen Geometrien anpassen lassen
- Reduzierung der Rechenzeiten bei der Lösung der nichtlinearen Magnetfeldgleichung, Einbeziehung effektiver mathematischer Auflösungsverfahren für lineare Gleichungssysteme
- Behandlung zeitabhängiger Magnetkreisprobleme.

Beiträge der ersten Wintertagung

[1] *Halle, H.; Pohl, A.:* Anwendung der numerischen Magnetfeldberechnung zur Lösung von Problemen elektromagnetischer Energiewandler

[2] *Kunze, W.:* Überführung der elektrischen Maschine in berechenbare Feldabschnitte

[3] *Heinrich, B.:* Numerische Lösung elliptischer Differentialgleichungen mittels Diskretisierungsmethoden

[4] *Weinelt, W.:* Numerische Lösung parabolischer Differentialgleichungen mittels Diskretisierungsmethoden

[5] *Pohl, A.:* Programmpaket FELD zur numerischen Berechnung stationärer Magnetfelder

[6] *Pohl, A.; Götz, D.:* Numerische Berechnung magnetischer Feldkräfte und Drehmomente

[7] *Steinbach, H.; Pohl, A.:* Anwendung des Programmpaketes FELD zur Berechnung magnetischer Felder in kleinen Wechselstromreihenschlußmotoren

[8] *Kunze, W.; Kuß, H.:* Übersicht zur numerischen Magnetfeldberechnung an der Technischen Universität Dresden

[9] *Kuß, H.; Körting, R.:* Programmpaket MFD

[10] *Wilhelm, H.-R.:* Rechenprogramm mit der Methode der finiten Elemente und einem iterativen Lösungsverfahren

[11] *Kuß, H.:* Rechenprogramm mit der Methode der finiten Elemente und einem direkten Lösungsverfahren

[12] *Wagner, M.:* Programme zur numerischen Magnetfeldberechnung nach der Spiegelungs- und Netzwerkmethode

A. Pohl, Karl-Marx-Stadt EA 1710

Leiterwerkstoffe und Verbindungstechnik

1. Fachtagung „Werkstoffe der Elektronik"

Mit mehr als 100 Teilnehmern konnte im Februar 1984 in Karl-Marx-Stadt die sehr interessante und informative Veranstaltung bei hohem wissenschaftlichem Niveau durchgeführt werden. Die bemerkenswerte Sachkenntnis der Veranstaltungsteilnehmer trug nicht zuletzt dazu bei, daß rege Diskussionen geführt werden konnten. Das Ansehen der Tagung ist auch daraus ableitbar, daß der stellvertretende Vorsitzende des KDT-Bezirksvorstandes, Prof. Dr. *H. Olbricht*, die Veranstaltung eröffnete und ökonomische Ergebnisse aus wissenschaftlichen Erkenntnissen in den Vordergrund rückte.

Der erste Vortragsabschnitt war der konventionellen, aber auch der nichtkonventionellen Elektronenleitung und ihrer Realisierung gewidmet. *L. Michalowski* sprach über die möglichen Leitungsmechanismen und über Werkstoffprobleme, die hiervon nicht getrennt werden dürfen. Zum klassischen Anteil des Elektronen-Phononen-Streuprozeß tritt der temperaturunabhängige, durch Baufehler verursachte Gitteranteil hinzu. Die Nutzanwendung der Matthiesen-Regel läßt die Werkstoffprobleme und auch die technologischen Varietäten in einem interessanten Licht erscheinen. Schließt man die Leitung über Traps bei tiefen Temperaturen und die Tunnelelektronenleitung in die Diskussion ein, so erhält man ein relativ geschlossenes Bild der gegenwärtigen Erkenntnisse. *C. Hamann* ergänzte mit einem vielbeachteten Beitrag über die Solitonenleitung und über andere Leitungsformen bei quasi eindimensionalen Materialien die Seite der physikalischen Grundlagen. Solche Forschungsergebnisse sind sowohl aus theoretischer Sicht als auch für praktische Zwecke hochinteressant.

Der zweite Abschnitt befaßte sich mit Fragen der Leiterwerkstoffe und ihrer Verbindungselemente in der Starkstromtechnik. Von *W. Richter* stammte ein Bericht über konventionelle und auch andere Leiterwerkstoffe. Der Vortragende stellte von allgemeinen Konzepten ausgehend Beurteilungsgrößen vor, mit deren Hilfe der jeweilige Spezialfall behandelt werden sollte.

W. Beyer sprach über Fragen der Verbindungstechnik bei Al-Drähten. Die Oberflächengestaltung ist eine wichtige Komponente für den Übergangswiderstand bei Schaltanlagen. Auch das Verbindungsverfahren ist in solche Betrachtungen einzubeziehen. Über die Kabelfertigung sprach anschließend *G. Flügge*. Seine Betrachtungen über die Cu-Substitution in der Kabelfertigung und die Hinweise über die Anwendungsbreite von AlCu-Materialien wurden mit größter Aufmerksamkeit verfolgt. Die Ausstattung des Vortrages erlaubte einen guten Einblick in die Besonderheiten in der Kabelindustrie.

Die Montageprobleme einschließlich der zugehörigen Anschlußtechnik führten in die Mikroelektronik ein. *D. Gerber* behandelte die Montage integrierter Schaltkreise und *K. Berndt* die zugehörigen Anschlußtechniken. Die Mehrlagenkonzepte standen im ersten Vortrag ebenso zur Sprache wie die hochmodernen Filmträger-Montagen und die Flip-chip-Montage. Der zweite Teil behandelte die Werkstoffe für Kontaktsysteme bei der Drahtkontaktierung (Bondinsel, Draht, Kontaktinsel) sowie bei der Simultankontaktierung. Die Probleme der Zuverlässigkeit ergänzten das werkstofftechnisch-technologische Bild. Der Umgang mit den Werkstoffen war in die Spezialfälle integriert. Nahtlos schloß der Vortrag von *S. Schiller* an die vorausgegangenen Vorträge an. Er befaßte sich mit den modernsten Erkenntnissen beim Bedampfen und beim Sputtern. Seit 1975 steht mit dem Plenar-Plasmatron die Möglichkeit zum high-rate-sputtering zur Verfügung. Zur Abschirmung von Diffusionsprozessen hat sich beispielsweise TiN vorzüglich bewährt.

Sonderfälle der Werkstofflösungen liegen heute als Pasten vor. *I. Storbeck* entwickelte ein geschlossenes Bild über die Pastenentwicklung und -erprobung. In der Hybridtechnik fand diese Lösung breite Anwendung. Die zur Sprache gebrachten Fragen und Probleme zeigten, welche Details noch bearbeitet werden sollte, wie polymere Leiterpasten und welche Stellung Edelmetall-Leitpasten in der Hybridtechnik einnehmen. Von hohem Stellwert ist auch die Tatsache, daß nach *R. Gesemann* chemisch abgeschiedene Schichten Beachtung verdienen. Das chemisch reduktive Abscheidungsverfahren ermöglicht, einwandfreie Schichten auf Keramiken herzustellen und gleichzeitig Edelmetall zu substituieren. Das Nickelmetall mit P-Gehalten ist von speziellem Interesse. Mit einer technologischen Thematik über die Mikrodrahtkontaktierung mit der Methode der ultraschallgestützten Thermokompression wurde ein Einblick in ein Spezialgebiet dargelegt. *H. Opitz* sprach in diesem Zusammenhang über piezoelektrische Bauelemente der Mikroakustik. Es besteht die Notwendigkeit, die Verfahrenstemperaturen herabzusetzen. Durch die Wirkung des Ultraschalls kann die Temperatur der Thermokompression erheblich reduziert werden.

Die interessanten Vorträge vermittelten insgesamt einen guten Überblick über das gewählte Fachgebiet. Den Teilnehmern lagen Kurzfassungen der Vorträge vor.

W. Richter, Karl-Marx-Stadt EA 1706

Mikroelektronik

Studentenkonferenz an der TH Karl-Marx-Stadt

Am 15. und 16. Februar 1984 wurde an der Technischen Hochschule Karl-Marx-Stadt die II. Zentrale interdisziplinäre wissenschaftliche Studentenkonferenz „Entwicklung und Anwendung der Mikroelektronik" durchgeführt. Mit 115 Vorträgen (im Plenum und in 8 Arbeitsgruppen) gestaltete sich die Konferenz zu einem breiten Erfahrungsaustausch über neueste wissenschaftliche Erkenntnisse der Herstellung und Applikation mikroelektronischer Schaltkreise.

Über „Die Rolle der Mikroelektronik bei der Beschleunigung des wissenschaftlich-technischen Fortschritts und der Verwirklichung der Hauptaufgabe" sprach Prof. Dr.-Ing. habil. *M. Krauß*, Rektor der THK. Dr. *W. Posner*, Sekretär des Zentralrates der FDJ, sprach „Zu den Aufgaben der FDJ-Studenten und jungen Wissenschaftler bei der weiteren Verwirklichung des Friedensaufgebotes der FDJ". Über „Die sozialökonomischen Auswirkungen der Mikroelektronik auf die Gesellschaft" referierte Prof. Dr. sc. phil. *E. Jobst* (THK).

Zwei weitere Plenarvorträge hielten der Student *B. Aschenbach* (THK) und der Forschungsstudent *U. Hübner* (THK).

Themenkomplexe der 8 Arbeitsgruppen:

- Physikalische Grundlagen der Mikroelektronik (AG 1)
- Mikroelektronische Schaltkreise (AG 2)
- Mikroelektronik-Applikation in der Informationstechnik, Rechentechnik und Datenverarbeitung (AG 3)
- Mikroelektronik in der Roboter- und Handhabetechnik (AG 4)
- Mikroelektronik-Applikation in der Gerätetechnik (AG 5)
- Einsatz der Mikroelektronik in der Industrie (AG 6)
- Anwendung der Mikroelektronik für Leitung, Planung und Organisation der Volkswirtschaft (AG 7)
- Gesellschaftswissenschaftliche Aspekte beim Einsatz der Mikroelektronik (AG 8).

A. Menzel, Karl-Marx-Stadt EA 1715

ZEITSCHRIFTEN

Adaptive automatische Regelung elektromechanischer Systeme

Borzov, J. A.; Poljachov, N. D.; Putov, V. V.: Električestvo, Moskau (1982) 7, S. 51–55

Adaptive Regelungen ermöglichen eine Verbesserung der Stabilität und der dynamischen Eigenschaften elektromechanischer Systeme mit veränderlichen Parametern. Trotz vielfältiger Veröffentlichungen und einem hohen Niveau der Mikroelektronik werden adaptiv geregelte Elektroantriebe in der Industrie bisher kaum angewandt. Im Aufsatz werden Strukturen für die adaptive Regelung unifizierter Elektroantriebe vorgestellt und einige Forschungsergebnisse dargelegt.

Um die Forderungen der Industrie nach Elektroantrieben mit zeitinvarianten Eigenschaften zu erfüllen, müssen z. B. bei Industrierobotern, Werkzeugmaschinen und Walzstraßen Änderungen der Kreisverstärkung bis zum Zehnfachen kompensiert werden. Dabei erfolgt die Parameteränderung mitunter schnell in bezug auf das Übergangsverhalten. Deshalb werden nichtsuchende, selbsteinstellende Algorithmen vorgeschlagen, die die Parameteradaption und die Signaladaption miteinander kombinieren. Die im Bild 1 abgebildete Struktur besteht aus der Regelstrecke mit zeitvarianten Parametern, dem Zustandsbeobachter, dem Vergleichsmodell — beide mit festen Parametern — der Zustandsrückführung mit festen Verstärkungsfaktoren, dem Signaladaptionszweig und dem Parameteradaptionszweig. Die Stabilität des Gesamtsystems wird über die Ermittlung der Verstärkungsfaktoren der Adaption nach der direkten Methode *Ljapunovs* gewährleistet.

Als Vorteile dieser Struktur gegenüber nicht kombinierten Strukturen wurden genannt:

- Verminderung der Anzahl der einzustellenden Parameter und damit Senkung des Aufwandes für die Parameteradaption
- Beibehalten des adaptiven Charakters des Systems auch bei großen, d. h. mehr als zehnfachen Parameteränderungen
- kurze Adaptionszeiten, d. h., die Adaptionszeiten liegen unter der für einen Übergangsvorgang benötigten Zeit und
- Verbesserung des Störverhaltens.

Experimentelle Ergebnisse wurden an einem unifizierten Elektroantrieb durchgeführt. Die Kreisverstärkung änderte sich um den Faktor 15. Wie aus Bild 2 zu entnehmen ist, konnte das unbefriedigende Übergangsverhalten der konventionellen Regelung mit konstanten Reglerverstärkungen durch den adaptiven Regler des kombinatorischen Typs deutlich verbessert werden. Bereits in früheren Arbeiten wurde das Prinzip der Signaladaption für geringere Parameteränderungen (kleiner Faktor 10) erfolgreich angewandt. Dieser adaptive Regler wurde als Hybrid-Schaltkreis in Analogtechnik realisiert und wird zusätzlich zum konventionellen PI-Regler in die Antriebsregelung geschaltet. In Bild 3 wird gezeigt, daß damit Parameteränderungen bis zum Faktor 10 beherrscht werden können.

A. Lappat, Dresden EA 1631

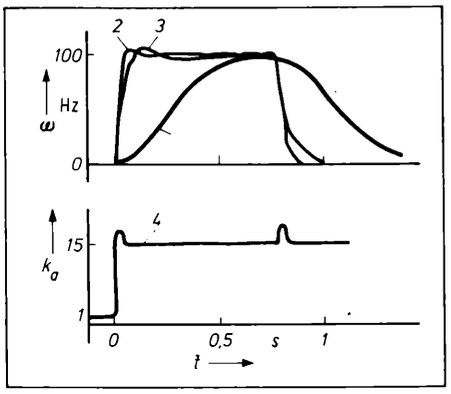


Bild 1. Strukturschema des kombinierten adaptiven Systems
1 nichtstationäres Objekt
2 Vergleichsmodell
3 stationärer Beobachter
4 Parameteradaptionszweig
5 Signaladaptionszweig

Bild 2. Oszillogramme der Winkelgeschwindigkeit des Elektroantriebs mit kombinierter Adaption
1 Winkelgeschwindigkeit ω des Antriebs bei 15fach vermindertem Verstärkungsfaktor k_a ohne Adaption
2 mit Adaption
3 Winkelgeschwindigkeit ω_M des Vergleichsmodells
4 Verlauf der Identifikation von k_a

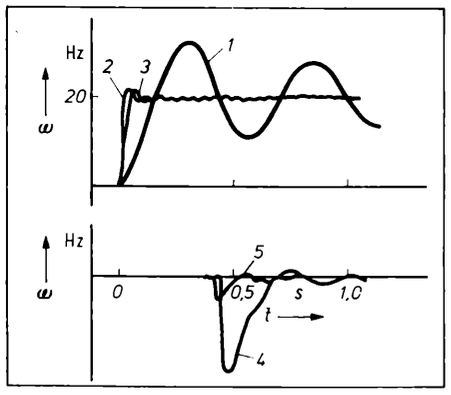
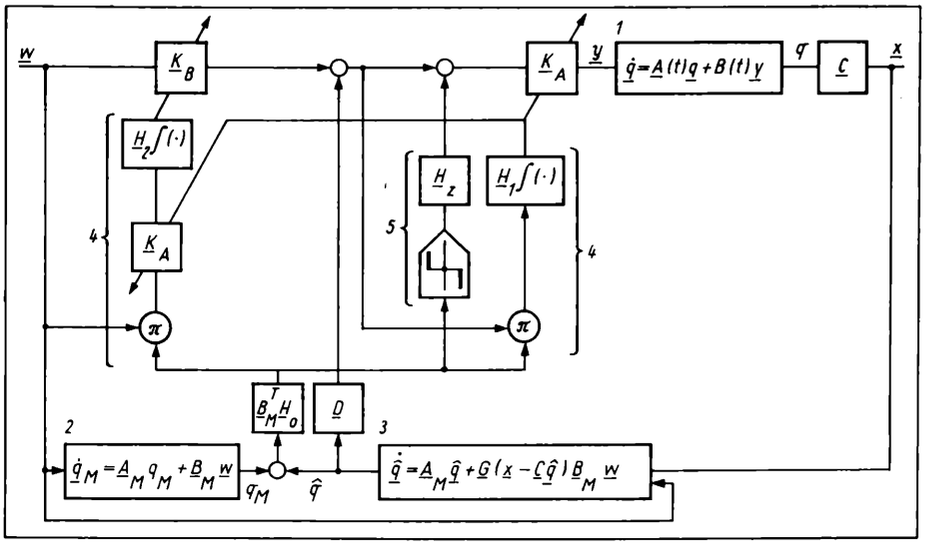


Bild 3. Oszillogramme der Winkelgeschwindigkeit des Elektroantriebs mit Signaladaption
a) Führungsverhalten:
1 Winkelgeschwindigkeit ω des Antriebs bei 8fach verändertem Lastträgheitsmoment ohne Adaption
2 mit Adaption
3 Winkelgeschwindigkeit ω_M des Vergleichsmodells
b) Störverhalten
4 Winkelgeschwindigkeit ω bei einem Sprung des Lastmoments auf den Nennwert ohne Adaption
5 mit Adaption



Bürstenlose Synchrongeneratoren für kleine Windkraftanlagen

Otto, A.: Der Elektro-Praktiker, Berlin 38 (1984) 5, S. 159–161

Welcher Generatortyp sich für kleine Windkraftanlagen eignet, richtet sich nach der Beschaffenheit des Windmotors und dessen Drehzahlregelung. Bei der Auswahl müssen auch die Eigenheiten der Verbraucher beachtet werden, für die die Anlage vorgesehen ist. Soll die Windkraftanlage auf ein öffentliches Netz arbeiten, kommen Asynchrongeneratoren in Betracht. Ein Verbrauchernetz, das keine Unterbrechungen verträgt, benötigt Batteriepufferung. Dazu eignen sich kleine Gleichstromgeneratoren, die als Lichtmaschinen bekannt sind und sich durch weite Drehzahlbereiche auszeichnen. Für sonstige Anlagen im Inselbetrieb können Synchrongeneratoren verwendet werden. Dabei kommen bürstenlose Maschinen den in kleinen Windkraftanlagen anzutreffenden Bedingungen entgegen. Die Ansprüche an die Wartung sind gering, und das Reibungsmoment im Stillstand ist klein.

Mit Drehzahlregelung versehene Windmotoren, die eine Drehzahlkonstanz mit einer Genauigkeit von etwa 2,5 ··· 3% erreichen, gestatten es, normale selbsterregte, kompoundierte und geregelte Synchrongeneratoren einzusetzen. In Anlagen mit größeren Drehzahlschwankungen sind mit Rücksicht auf Verbraucher mit magnetischen Kreisen (Motoren, Transformatoren, Schützspulen usw.) Generatoren anzuwenden, deren Klemmenspannung sich proportional der Drehzahl und damit der Frequenz verhält. Eine Schaltungsanordnung, die Konstantspannungsgeneratoren diese Eigenschaft aufprägt, wird beschrieben. Weiterhin wird auf Möglichkeiten hingewiesen, Verbraucher, die von der Frequenz unabhängig konstante Spannung benötigen, solchen Anlagen anzupassen.

A. Otto, Finsterwalde EA 1699

Anwendungsgebiete von Synchron-Asynchron-Generatoren

Krivuškin, L. F.; Čebyčelov, V. A.: Električeskie stancii (1983) 10, S. 38–41

Die Synchron-Asynchron-Generatoren sind mit Längs- und Quererregungswicklung sowie mit Zweikanalreglung ausgerüstet. Ihre Regelfähigkeit ist im Vergleich mit Synchrongeneratoren bedeutet größer, insbesondere für Regime der Blindleistungsaufnahme und für die dynamische Stabilität. Untersuchungen zeigten, daß es sinnvoll ist, Synchron-Asynchrongeneratoren in Kraftwerken mit Blockgrößen 800-1000-1500 MW zu lokalisieren, die in das 750-kV- und 1150-kV-Netz einspeisen.

Es erweist sich als günstig, Synchron-Asynchron- und traditionelle Synchrongeneratoren in jenen Kraftwerken zu kombinieren. Ein optimales Verhältnis ist bei 50% Synchrongeneratoren und 50% Synchron-Asynchron-Generatoren erreicht. Die Inbetriebnahme der Synchron-Asynchron-Generatoren muß jedoch zuerst in den Kraftwerken erfolgen. Die Entwicklungsarbeiten des 1000-MW-Synchron-Asynchron-Generators sind zu beschleunigen, um sie rechtzeitig für die Kraftwerke im europäischen Teil der Sowjetunion zur Verfügung zu haben. Im Zeitraum von 1990 bis 1995 werden ungefähr 30 bis 40% der 1000-MW-Generatoren in Form von Synchron-Asynchron-Generatoren benötigt.

E. Broßmann, Berlin EA 1725

Die Vervollkommnung des Ventilationssystems von Turbogeneratoren mittels Nutverschlußkeilen im Ständer, die in den Luftspalt hineinreichen

Avruch, V. Ju.; Duginov, L. A.: Električestvo (1982) 6, S. 43–46

Die modernen Turbogeneratoren sind im allgemeinen mit Wasserstoff gefüllt, der dort als Kühlmedium Anwendung findet. In den Turbogeneratoren der Serie TWW, welche insbesondere in diesem Artikel betrachtet werden, erfolgt die Kühlung in einem einstrahligen Kreislauf. Die Ventilatoren an beiden Enden des Läufers saugen das Gas aus dem Spalt zwischen Läufer- und Ständerblechpaket und drücken es durch die an der Ständerperipherie angeordneten Kühler und die radialen Kanäle im Ständerblechpaket in den Luftspalt, wo es vom Läufer zur Kühlung der Läuferwicklung aufgesaugt und erneut in den Luftspalt abgegeben wird.

Dieses einstrahlige Ventilationssystems erlaubt eine einfache Ständerkonstruktion und schafft sehr gute Bedingungen zur Kühlung der sich stark erhitzenden Endzonen des Ständerblechpaketes. Als größter Nachteil kann die starke Aufwärmung des Gases im Luftspalt des Generators angesehen werden. Experimentelle Untersuchungen zeigten längs des Generators große Unterschiede der Wasserstoffgeschwindigkeit in den radialen Ständerkanälen und infolgedessen große Wärmeunterschiede im Ständerblechpaket und noch größere im Läufer. Bei einer mittleren Erhitzung des Gases im Luftspalt um 30 bis 40°C gegenüber dem Kaltgas beträgt der maximale Temperaturunterschied 60 bis 70°C. Das führt bei völlig gleichartiger konstruktiver Ausführung der einzelnen Ständerblechpaketsegmente zu maximalen Temperaturunterschieden von 40 bis 50°C. Da jedoch die Isolation und Gesamtkonstruktion des Generators für die heißesten Stellen ausgelegt sein muß, würde die Behebung dieser Ungleichmäßigkeiten große Leistungsreserven aufdecken.

Bis Anfang der 70er Jahre arbeitete man hauptsächlich an der Optimierung der schrägen Ansaug- und Abzugskanäle im Läufer. Erst danach wurden die Gasgeschwindigkeits- und Druckverhältnisse im Luftspalt komplexer untersucht. Als Hauptproblem stellte sich die hohe tangentiale Geschwindigkeit des Wasserstoffs heraus, welcher sich infolge der hohen Läufergeschwindigkeit (3000 U/min) im Luftspalt radial bewegt. Infolgedessen entsteht ein Gegendruck zum Hauptgasstrom aus den radialen Kanälen, der den Gasdurchsatz verringert und die Effektivität der Kühlung herabsetzt.

Zum Bremsen des Gases in radialer Richtung wurden kompakte bis zu 25 mm in den Luftspalt reichende durchgängige Nutverschlußkeile des Ständers zum ersten Mal 1972 in einem Generator des Typs TWF-60-2 eingebaut. Um die Effektivität zu erhöhen, da die ersten Resultate recht bescheiden ausfielen, wurden kombinierte Nutverschlußkeile entwickelt, die aus einem festen Glasfaserkeil und einem Gummiteil bestehen. Der Gummiteil reicht in den Luftspalt und gewährleistet eine maximale Abdichtung. Detaillierte Untersuchungen ergaben, daß bei durchgängigen, über die ganze Ständerlänge angebrachten kombinierten Nutverschlußkeilen sich direkt vor ihnen ein statischer Überdruck aufbaut, der den Gasdurchsatz durch die radialen Kanäle dort vermindert und damit zu lokalen Überhitzungen im Ständer führt. Zur Liquidierung dieses unerwünschten Effekts werden die kombinierten Keile nicht durchgängig über die gesamte Ständerlänge ausgeführt, sondern unterbrochen mit periodisch in den Luftspalt hineinreichenden Zähnen. Diese Zähne bremsen den Gasstrom in tangentialer Richtung, und die Lücken dazwischen beseitigen die lokalen Überdruckzonen. Diese Zähne werden in vier, acht oder zwölf Ständernuten schachbrettartig auf der inneren Ständeroberfläche angeordnet. Die optimale Anordnung wird seit 1974 in verschiedenen Typen der Turbogeneratorserie TWW angewendet.

Ein Generator TWW-320-1 des Wärmekraftwerkes Konakowo, welcher mit zusätzlichen Temperaturmeßstellen ausgerüstet war, wurden 1978 nach der oben beschriebenen optimalen Variante rekonstruiert. Die Messungen nach der Rekonstruktion zeigten, daß die maximale Überhitzung im Läufer um 50°C und im Ständerblechpaket um 25 bis 30°C bei dem Betrieb mit Nennleistungskoefffzient cos φ gesenkt werden konnten. Der Ausgleich der Temperaturen in Längsrichtung und auch in Umfangsrichtung des Ständerblechpaketes und Läufers ist einer Leistungssteigerung des Generators um 25 bis 30% äquivalent. Diese neue konstruktive Lösung eröffnet den zwei- und vierpoligen Turbogeneratoren mit Wasserstoffkühlung des Ständerblechpaketes und des Läufers neue ungeahnte Perspektiven.

E. Broßmann, Berlin EA 1301

BÜCHER

Theoretische Grundlagen der Nachrichtentechnik

Von *G. Fritzsche*. Berlin: VEB Verlag Technik 1984. 3., stark bearbeitete Auflage. 544 Seiten, 227 Bilder, 66 Tafeln. Leinen 35,- Mark.
Bestell-Nr.: 553218 2

Die erste Auflage dieses bekannten Hochschullehrbuches von Prof. *Fritzsche* erschien bereits 1972. Seit dieser Zeit hat der Autor beim Einsatz seines Lehrbuches in der Ausbildung umfangreiche zusätzliche Erfahrungen gesammelt, die in der nun vorliegenden 3., stark bearbeiteten Auflage ihren Ausdruck gefunden haben. Die Überarbeitung berücksichtigte sowohl inhaltliche Aspekte als auch Elemente der Methodik der Wissensvermittlung.

Die inhaltliche Gliederung umfaßt nunmehr fünf größere Abschnitte und einen Anhang. Im ersten Abschnitt werden mathematische Hilfsmittel und Grundbegriffe zusammengestellt. Er enthält außerdem Grundlagen der Elektrotechnik, der Signalbeschreibung und der Informationsübertragung. Der zweite Abschnitt behandelt die Analyse von Teilsystemen (Zweipole, Vierpole, Leitungen, zeitdiskrete Systeme) und der dritte deren Synthese. Der vierte Abschnitt ist Problemen der Systemtheorie gewidmet. Er enthält Fragen der Signaltheorie, der Schalt- und Abtastvorgänge sowie der Rauschvorgänge, der Optimalfilterung und grundlegende Aspekte der Modulationsvorgänge. Im fünften und letzten Abschnitt werden Grundlagen der Informationstheorie und der technischen Nachrichtenübertragung vermittelt.

Die methodische Gestaltung läßt die in jahrzehntelangem Umgang mit Studierenden erworbene Gewandtheit des erfahrenen Hochschullehrers deutlich hervortreten. Fast alle Teilabschnitte beginnen mit einer Einordnung der zur Diskussion stehenden Problematik, der Fixierung des Studienzieles und Begriffsbestimmungen. Anschließend erfolgt die eigentliche Wissensvermittlung, und den Abschluß bilden eine Zusammenfassung mit Ausblick sowie Anwendungsbeispiele und Aufgaben. Der gesamte Text ist durch eine große Anzahl von Illustrationen, Tafeln, Übersichten und Gegenüberstellungen aufgelockert. Besonders wichtige Fakten und Formeln sind durch Hervorhebungen gekennzeichnet. Hinzu kommt die klare, prägnante und knappe Form der Darstellung, die für den Stil der zahlreichen Bücher des bekannten Autors charakteristisch ist.

Das vorliegende Buch ist in erster Linie als Lehrbuch für Studierende der Informationstechnik zum Gebrauch neben der Vorlesung bestimmt (Die Stoffauswahl ist an den zentralen Lehrprogrammen des Ministeriums für das Hoch- und Fachschulwesen der DDR orientiert). Dieses Buch ist aber mehr als nur ein Lehrbuch für Studierende. Obwohl im Titel von theoretischen Grundlagen gesprochen wird, siedelt es sich durch die zahlreichen praxisorientierten Übungsaufgaben und Anwendungen in der Nähe der Probleme an, die der Ingenieur in seinem täglichen Berufsleben zu lösen hat, wenn

auch verständlicherweise auf tatsächliche Geräteausführungen nicht eingegangen werden kann. Neben den Studierenden dürfte dieses Buch deshalb auch für einen breiten Kreis von Ingenieuren in der Praxis und nicht zuletzt auch dem Hoch- und Fachschullehrer selbst als Lehrbuch, Nachschlagewerk und Quelle vieler wertvoller Anregungen von großem Nutzen sein.

H. Schreiber, Dresden EA 1737

Moderne Vakuumelektronik — Grundlagen, Bauelemente, Technologie

Von *J. Eichmeier*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag 1981. 412 Seiten, 430 Bilder.

Der Verfasser zeigt, daß auf dem Bauelementesektor die vakuumelektronische Lösung einmal wegen der räumlichen Trennbarkeit des elektronischen Wechselwirkungsraumes vom Entstehungsort der Verlustwärme überall dort der festkörperelektronischen Lösung überlegen ist, wo es sich insbesondere um hohe Leistungen bei hohen Frequenzen handelt, und zum anderen, daß bei der optischen Informationsausgabe oft die vakuumelektronische die elegantere Lösung darstellt, und das gerade bei den Bauelementen, bei denen Massenbedarf vorliegt. Dankenswerterweise beschränkt sich der Verfasser jedoch nicht auf die vakuumelektronischen Bauelemente, sondern er behandelt auch die vakuumelektronischen Anlagen und Großanlagen, wie Teilchenbeschleuniger, Elektronenmikroskope, Massenspektrographen, Sims- und Augerelektronenspektroskope, Ionenimplantationsanlagen, Anlagen der Elektronenstrahllithographie, ohne die heute ein wissenschaftlich-technischer Fortschritt gerade auch auf dem Gebiet der Mikroelektronik nicht denkbar wäre. Bei der Lektüre wird deutlich, in wie starkem Maße unterschiedliche Lösungswege zur Bauelementeherstellung — wie die festkörpertechnologische und die vakuumelektronische — sich gegenseitig ergänzen und unterstützen. Vor einer Zusammenstellung der ergänzenden und weiterführenden Literatur werden in neun Kapiteln die Tatbestände der Vakuumelektronik, ihrer Grundlagen und Technologien mitgeteilt:

1. Die Gleichungen der elektrischen und magnetischen Felder und die die Bewegung von Elektronen im idealen Vakuum beschreibenden Gleichungen. **2.** Feld- und Bahnbestimmungsmethoden mit einer Betrachtung zur Energie eines Elektrons im ganz allgemeinen für Mikrowellenröhren wichtigen Fall, daß sich das äußere Feld ändert, während das Elektron sich bewegt. **3.** Elektronenemissionsvorgänge im Vakuum einschließlich Energiebändermodell und einschließlich technische Kathoden auf thermischer, photoelektrischer, Sekundäremissions- und Kaltemissionsbasis unter Erwähnung von Anwendungsmöglichkeiten radioaktiver β-Strahler sowie die Vorgänge im Festkörper bei Elektronenabsorption und die Effekte der Wärme- und Lichtemission (Leuchtstoffe) und Entstehen von Röntgenstrahlung. **4.** Elektronenoptische Systeme, und zwar elektrische und magnetische Linsen sowie elektronenoptische Ablenksysteme, wobei Erzeugungs- und Fokussiersysteme für Elektronenstrahlen und diejenigen Röhren und Geräte in guter Systematik gebracht werden, die im wesentlichen auf dieser Basis arbeiten, wie Sekundärelektronenvervielfacher, Bildwandler und Bildverstärker sowie Wandlerröhren, die auf dem Elektronenstrahlprinzip arbeiten, wie Bildaufnahme- und Bildwiedergaberöhren für Schwarz-Weiß und Farbe und Bild- sowie Signalspeicherröhren. Außerdem werden Elektronenmikroskope der verschiedenen Spielarten und Elektronenstrahlgeräte zur chemischen Oberflächenanalyse von Festkörpern hier untergebracht sowie Anlagen zur Elektronenstrahlmetallurgie und Elektronenstrahllithographie. **5.** Im fünften Kapitel werden Elektronenströmungen im idealen Vakuum unter Raumladungseinfluß behandelt, also insbesondere Dioden, Trioden und Mehrgitterröhren, bei niedriger Frequenz und die Laufzeiteffekte bei zunehmender Frequenz sowie die Bauformen moderner dichtegesteuerter Hochvakuumröhren. **6.** Ein eigenes Kapitel ist den Mikrowellenröhren der verschiedenen Prinzipien (Triftröhren, Lauffeldröhren) gewidmet, d.h. Klystrons, Wanderfeldröhren, Carcinotrons, Magnetrons und Cyrotrons. **7.** Hier geht es um Teilchenbeschleuniger der verschiedenen physikalischen Typen, wie Linearbeschleuniger, Zyklotron, Betatron, Elektronen- und Protonensynchrontron und Synchronzyklotron und um die Hauptdaten der Cern-Beschleuniger. **8.** Die Voraussetzung idealen Vakuums wird naturnotwendigerweise fallen gelassen, wenn es um Grundlagen und Bauformen von Gasentladungsbauelementen geht. Hier wird eine große Anzahl von Röhren zum Teil sehr unterschiedlicher Wirkprinzipien behandelt, wie Geiger-Müller-Zähler, Gasphotozellen, Gasschaltdioden für Radarsysteme, Glimmlampen, Glimmstabilisatorröhren, Relaisröhren, dekadische Zähl- und Ziffernanzeigeröhren, Gasentladungsdisplays, Überspannungsableiter, Elektronenblitzröhren, Ignitrons, Lichtbogenöfen, Leuchtstoffröhren, Hg-Niederdruck- und Hochdrucklampen, gasgefüllte Hochspannungsgleichrichterröhren, Glühkathoden-Thyratrons. Die Gasentladungssysteme für die Festkörpertechnologie, wie Sputtern, Ionenätzen, Ionenimplantation werden hier gleichfalls behandelt und auch die dazu nötigen Ionenquellen sowie zum Schluß die Gas-Laser und Gas-Maser. **9.** Im neunten Kapitel geht es um vakuumtechnische und -technologische Probleme, nämlich Vakuumerzeugung und die dafür notwendigen Pumpen, um Vakuummessungen nach Druck und Restgaszusammensetzung, um Leck- und Getter-Problematik sowie um Werkstoffe und Bauteile der Vakuumtechnik.

Bei der Fülle des Gebotenen kann es wünschenswert erscheinen, die Gewichte in etwas anderen Proportionen zu sehen.

H. Göllnitz, Erfurt EA 1492

Epoxidharze in der Elektrotechnik

Band 109 Kontakt & Studium

Von *M. Meyer*, u.a. Grafenau: expert Verlag 1983. 1. Auflage, 238 Seiten, 183 Bilder, 10 Tafeln.

In dieser Edition haben namhafte Autoren aktuelle Kapitel der Epoxidharzverarbeitung und -anwendung behandelt. Im einzelnen werden Ausführungen zu folgenden Problemen gemacht:

1. Chemischer Aufbau und Eigenschaftsbild von EP-Formstoffen
2. Einige Gesichtspunkte für die Auswahl und Verarbeitung von Quarzmehl und anderen Füllstoffen in Epoxidharzen
3. Die dielektrischen Eigenschaften von Epoxidharz-Formstoffen
4. Durchschlagverhalten von Epoxidharzformstoffen
5. Glasfaserverstärkte Epoxidharze in der Elektrotechnik
6. Automatisches Vergießen von elektrischen und elektronischen Bauelementen mit Reaktionsharzen
7. Aufbereitung von Gießharzsystemen und automatische Fertigung von Bauteilen
8. Gießharzisolierte Mittelspannungswandler
9. Gießharzisolierte Trockentransformatoren
10. Gießharzisolatoren in Freileitungen
11. Gesichtspunkte bei der Fertigung von Isolatoren für SF_6-Hochspannungs-Schaltanlagen aus Epoxidharz
12. Fragen der Qualitätssicherung durch Hochspannungsprüfungen an elektrischen Betriebsmitteln und Bauteilen aus Epoxid-Formstoff
13. Der Einfluß von Feuchtigkeit auf die elektrischen Eigenschaften von EP-Harz-Formstoffen
14. Einfluß mechanischer Spannungen und elektrischer Beanspruchung auf das Teilentladungsverhalten von EP-Harzen
15. Die Bedeutung der Vernetzungsdichte für das mechanische und elektrische Verhalten von EP-Formstoffen.

Die Abhandlung der Einzelkapitel ist klar, verständlich und praxisorientiert. Die Abschnitte 1, 2, 6 und 7 sollten bei einer Neuauflage ausführlicher abgefaßt werden, da sie häufig die Grundlagen für die Entscheidung bilden, ob in einem Betrieb eine Gießharzverarbeitung aufgenommen wird oder nicht. Weiterhin müssen diese Kapitel die materialtechnischen und technologischen Grenzen aufzeigen, in denen eine Gießharzanwendung sinnvoll ist.

Die übrigen Kapitel geben einen Einblick in spezielle Probleme, wie sie häufig im Bereich der Elektrotechnik auftreten können. Leider werden nur bei den Kapiteln 2 bis 5 und 12 bis 15 ausreichend Literaturhinweise zur Vertiefung des Stoffes gegeben. Eine Ergänzung bei den übrigen Kapiteln wäre eine notwendige Bereicherung des Inhalts des Buches.

W. Ludeck, Berlin EA 1617

Laurent, K.-H.; Kunert, M.; Schulze, H.-P.: **Rechnergestützte Optimierung des elektroerosiven Senkprozesses (EDM)**

ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, S. 205 – 209, 8 Bilder, 1 Tafel, 16 Gln., 9 Lit.

Grundvoraussetzung zur Automatisierung des EDM-Verfahrens ist die Realisierung rechnergestützter Off- und On-line-Optimierstrategien. Die Sensortechnik und Baugruppen zur Datenvorverarbeitung in modularer Bauweise, die eine hohe Prozeßdynamik für Prozeßregelung und -steuerung zulassen, werden vorgestellt. Die Lösung mittels Mikrorechner MRS K 1520 ist anpaßbar an alle Anlagentechniken und Generatorvarianten.

Peitzsch, L.; Truong quang Miu: **Elektroerosives Trennen schwer spanbarer metallischer Werkstoffe mit rotierender Scheibenelektrode**

ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, S. 209 – 211, 1 Bild, 3 Tafeln, 3 Lit.

An der IHS Mittweida wurde unter Verwendung industriell gefertigter Bauteile eine elektroerosive Trennanlage mit rotierender Scheibenelektrode realisiert. Ihre Leistungsfähigkeit beim Trennen schwer spanbarer Werkstoffe, besonders von Hartmetall und gehärteten Stählen sowie Bi-Metallen wird nachgewiesen.

Nestler, K.; Wicht, H.: **Toxische Abprodukte und umweltgerechte Gestaltung des elektrochemischen Metallabtrages**

ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, S. 211 – 215, 7 Bilder, 8 Gln., 11 Lit.

Die elektrochemische Bearbeitung chromhaltiger Stähle in nitrathaltigen Elektrolytlösungen kann beim Bediener allergische Schädigungen hervorrufen. Ausgehend von grundlegenden Metallauflösungsreaktionen wird die Bildung und Entgiftung von Chromat diskutiert und quantifiziert. Für eine umweltgerechte Gestaltung der betrieblichen ECM-Technik werden Alternativen aufgezeigt.

Richter, W.; Hänel, U.: **Feste elektrische Verbindungen mit AlCu-Leitern bei Schwingbelastung**

ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, S. 215 – 217, 5 Bilder, 7 Lit.

Feste elektrische Schraub- und Klemmverbindungen werden oft dynamisch beansprucht. Dabei treten während der Beanspruchung infolge von Kriechprozessen Veränderungen im Kontaktverhalten auf. In speziellen Werkstoffprüfungen wurde dies kontrolliert. Die Ergebnisse aus den Experimenten insbesondere mit AlCu-Leitern und zugehörige Schlußfolgerungen werden vorgestellt.

Teßmer, R.; Springer, S.: **Digitale Simulation von Prozeßgrößen der Elektroantriebstechnik auf dem Mikrorechnerentwicklungssystem MRES 20**

ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, S. 218 – 219, 1 Bild, 1 Tafel, 5 Lit.

Es werden Ergebnisse bei der Anwendung der Mikrorechentechnik für die ingenieurmäßige Methode der Digitalen Simulation aufgezeigt. Das vorgestellte System DSAM 1520 für das Mikrorechnerentwicklungssystem MRES 20 ist ein interaktives Simulationssystem für analoge Systeme, das auch für Nutzer interessant ist, die nicht über Kenntnisse der Assemblerprogrammierung verfügen.

Ermisch, J.: **Betrachtungen zum Einsatz neuartiger Wandler**

ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, S. 219 – 222, 7 Bilder, 2 Gln., 14 Lit.

Voraussetzung für den Einsatz neuartiger Wandler ist eine leistungsarme Meßwertverarbeitung. Am Beispiel eines digitalen Schalttafelinstruments und einer quasianalogen Anzeige für Strom, Spannung und Leistungsfaktor werden Möglichkeiten zur Realisierung einfacher Meßgeräte mit geringem Leistungsbedarf aufgezeigt.

Metzner, H.; Roseburg, D.: **Die Ummagnetisierungsverluste geometrisch verkleinerter Modellanordnungen**

ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, S. 322 – 224, 5 Bilder, 1 Tafel, 22 Gln., 4 Lit.

Am Beispiel der Ummagnetisierungsverluste massiver Stahlringe wird die Eignung geometrisch verkleinerter Modelle für Meßzwecke dargelegt sowie ein Verfahren zur analytischen Verlustbestimmung in massiven ferromagnetischen Bauteilen angegeben und erprobt.

Gruhn, G.: **Zur Anpassung von Schutzstromwandlern an den unabhängigen elektronischen Überstromzeitschutz**

ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, S. 224 – 227, 7 Bilder, 18 Gln., 5 Lit.

Das Fehlerverhalten des unabhängigen elektronischen Überstromzeitschutzes wird wesentlich durch die Stromwandlereingangsschaltung beeinflußt, deren Übertragungsverhalten im Betriebsstrom- und Kurzschlußstrombereich untersucht wird. Die Ergebnisse zeigen, daß Schutzstromwandler nicht den allgemein gestellten hohen Anforderungen entsprechen müssen, da diese von den Schutzgeräteeingangswandlern gleichermaßen nicht erfüllt werden können.

Bunzel, E.; Hauptmann, M.; Kunckel, K.-H.; Paulig, E.; Schubert, P.: **Ausgewählte Probleme bei Messungen an elektrischen Maschinen**

ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, S. 227 – 230, 8 Bilder, 1 Tafel, 5 Gln., 8 Lit.

Es werden eine Möglichkeit der Drehmomentmessung mittels elektrischer Größen, die Messung magnetischer Feldgrößen an rotierenden elektrischen Maschinen, die quantitative Bestimmung der Bürstenfeuerintensität an Kommutatormaschinen und die Verschleißmessung am Bürsten/Kommutatorapparat von Gleichstromkleinstmaschinen vorgestellt.

Лаурент, К.-Х.; Кунерт, М.; Шульце, Х.-П.: **Об оптимизации процесса электроэрозивной прошивки при помощи ЭВМ**

ELEKTRIE, Берлин 38 (1984) 6, стр. 205—209, 8 рис., 1 табл., 16 уравн., 9 лит.

Основным условием для автоматизации процесса электроэрозивной прошивки является реализация при помощи ЭВМ стратегий оптимизации в режимах Off-line и On-line Представляются аппаратура воспринимающих органов и узлы предварительной обработки данных построенные по модульному принципу и допускающие высокую динамику процессов в части регулирования и управления процессами. Решение с использованием микро-ЭВМ системы MRS K 1520 позволяет приспособление к всем видам оборудования и всем вариантам генераторов.

Пайч, Л.; Труонг кванг Муй: **Электроэрозионная резка металлических матриалов, трудно поддающихся обработке резанием, при помощи вращающегося диского электрода**

ELEKTRIE, Берлин 38 (1984) 6, стр. 209—211, 1 рис. 3 табл. 3 лит.

На техническом ВУЗ г. Миттвайда с применением изготовленных промышленностью узлов реализован электроэрозионный отрезной станок с вращающимся дисковым электродом. Доказывается его производительность при разрезании трудно поддающихся обработке резанием материалов, в частности твердых сплавов и закаленных сталей, а также биметаллов.

Нестлер, К.; Вихт, Х.: **Токсические отходы и безвредная для среды организация электрохимической обработки металлов**

ELEKTRIE, Берлин 38 (1984) 6, стр. 211—215, 7 рис., 8 уравн. 11 лит.

Электрохимическая обработка хромистой стали в растворах электролита содержащих нитрат, у оператора может вызвать аллергические повреждения. Основываясь на принципиальных реакциях растворения металлов обсуждается и квантифицируется образование и обезвреживание яда хромата. Показываются альтернативы по безвредной для среды организации производственных процессов электрохимической обработки металлов.

Рихтер, В.; Хэнель, У.: **Жесткие электрические соединения с проводниками AlCu в случае воздействия вибрационных нагрузок**

ELEKTRIE, Берлин 38 (1984) 6, стр. 215—217, 5 рис. 7 лит.

Жесткие электрические резьбовые и зажимные соединения часто подвергаются динамическим нагрузкам. При этом, во время воздействия нагрузки возникают изменения свойств контактирования вследствие процессов электрической утечки. Представляются результаты и соответствующие заключения по экспериментам проведенным в частности на проводниках AlCu.

Тэсмер, Р.; Шпрингер, З.: **Цифровое моделирование величин процессов техники электроприводов при помощи системы микро-ЭВМ MRES 20**

ELEKTRIE, Берлин 38 (1984) 6, стр. 218—219, 1 рис., 1 табл. 5 лит.

Представляются результаты, полученные от применения техники микро-ЭВМ для инженерного метода цифрового имитационного моделирования. Рассамтриваемая система DSAM 1520 для системы микро-ЭВМ MRES 20 представляет собой интерактивную систему имитационного моделирования для аналоговых систем, представляющую интерес и для пользователей, не обладающих знаниями в области программирования на языке ассемблера.

Эрмиш, Й.: **Соображения по применению преобразователей нового типа**

ELEKTRIE, Берлин 38 (1984) 6, стр. 219—222, 7 рис., 2 уравн., 14 лит.

Условием для применения преобразователей нового типа является маломощная обработка измерительных данных. На примере цифрового инструмента распределительного щита и квазианалоговой индикации для тока, напряжения и коэффициента мощности показываются возможности реализации простых измерительных приборов с маленькой оптребляемой мощностью.

Метцнер, Х.; Розебург, Д.: **Потери перемагничивания геометрически уменьшенных моделей**

ELEKTRIE, Берлин 38 (1984) 6, стр. 222—221, 5 рис., 1 табл., 22 уравн., 4 лит.

На примере потер перемагничивания сплошных стальных колец излагается пригодность геометрически уменьшенных моделей для измерительных целей, указывается и проверяется способ аналитического поределения потер в сплощных ферромагнитных деталях.

Грун, Г.: **О согласовании защитных трансформаторов тока с независимой электронной максимальной защитой тока с выдержкой времени**

ELEKTRIE, Берлин 38 (1984) 6, стр. 224—227, 7 рис., 18 уравн. 5 лит.

На характеристику ошобок независимой электронной максимальной защиты с выдержкой времени существенное влияние оказывает входная схема трансформатора, характеристика передачи которой исследуется в диапазонах рабочего тока и тока короткого замыкания. Результаты показывают, что защитные трансформаторы не должны отвечатьпредъявленным к ним, как правило, высоким требованиям, т. к. они также не могут выполняться входными трансформаторами защитных приборов.

Бунцель, Э.; Хауптманн, М.; Кункель, К.-Х.; Паулиг, Э.; Шуберт, П.: **Выбранные проблемы измерения на электрических машинах**

ELEKTRIE, Берлин 38 (1984) 6, стр. 227—230, 8 рис., 1 табл., 5 уравн., 8 лит.

Представляются возможность измерения крутящего момента при помощи электрических величин, измерение величин магнитного поля на вращающихся электрических машинах, количественное определение интенсивности искрения под щеткой на коллекторных машинах и измерение износа щеточно-коллекторного оборудования малогабаритных машин постоянного тока.

Laurent, K.-H.; Kunert, M.; Schulze, H.-P.: **To the Computer Assisted Optimization of the Electroerosive Counterbore Process (EDM)**

ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, pp. 205 – 209, 8 Figs., 1 Table, 16 Equations, 9 Refs.

The realization of computer assisted off-line and on-line optimization strategies represents a basic prerequisite of automating the EDM-method. The sensor techniques and package units of the data processing in modular construction are represented, which allow high process dynamics of process controlling and regulating. The solution by means of the microcomputer MRS K 1520 is adaptable to all plant techniques and generator variants.

Peitzsch, L.; Truong quang Mui: **Electroerosive Separating of Hard-to-Machine Metallic Materials with Rotating Disk Electrode**

ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, pp. 209 – 211, 1 Fig., 3 Tables, 3 Refs.

At the Engineering Technical University of Mittweida (THS) an electroerosive separating plant with rotating disk electrode was realized using industrially made components. Its efficiency in separating hard-to-machine materials, especially hard metals and hardened steels as well as bimetals, is proved.

Nestler, K.; Wicht, H.: **Toxic By-Products and Environmentally Adapted Designing of the Electrochemical Metal Erosion (ECM)**

ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, pp. 211 – 215, 7 Figs., 8 Equations, 11 Refs.

The electrochemical working of steels, containing chromium, in electrolytic solutions, containing nitrates, may result in allergic damages of the operator. Starting from fundamental metal dissolution reactions the forming and detoxicating of chromate are discussed and quantified. To an environmentally adapted designing of the workable ECM-techniques alternatives are indicated.

Richter, W.; Hänel, U.: **Fixed Electric Connections of AlCu-Conductors during Vibration Load**

ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, pp. 215 – 217, 5 Figs., 7 Refs.

Fixed electric screw and terminal connections are loaded often dynamically. Thereby during the loading changes of the contact behaviour are appearing, caused by creep processes. In spezific material tests that effect has been controlled. The results of the experiments, especially those of the tests with AlCu-conductors, and the appertaining conclusions are represented.

Teßmer, R.; Springer, S.: **Digital Simulation of Process Quantities of the Electric Driving Techniques at the Microcomputer Development System MRES 20**

ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, pp. 218 – 219, 1 Fig., 1 Table, 5 Refs.

Results of the application of the microcomputer techniques for the engineering method of the digital simulation are specified. The represented system DSAM 1520 of the microcomputer development system MRES 20 is an interactive simulation system for analogue systems, which is also interesting for such users, who have no knowledges about the assembler programming.

Ermisch, J.: **Considerations about the Application of Novel Instrument Transformers**

ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, pp. 219 – 222, 7 Figs., 2 Equations, 14 Refs.

Prerequisite of the application of novel instrument transformers is a measured values processing of low power. By example of a digital panel instrument and a quasi-analogue indication for current, voltage and power factor possibilities of realizing simple measuring instruments with low power consumption are indicated.

Metzner, H.; Roseburg, D.: **The Magnetic Hysteresis Losses of Geometrically Reduced Model Arrangements**

ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, pp. 222 – 224, 5 Figs., 1 Table, 22 Equations, 4 Refs.

By example of the magnetic hysteresis losses of massive steel rings the aptitude of geometrically reduced models for measuring applications is specified and a method of analytical determination of losses in massive ferromagnetic components is represented and tested.

Gruhn, G.: **The Matching of Protective Current Transformers to the Independent Electronic Overcurrent Time Protection**

ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, pp. 224 – 227, 7 Figs., 18 Equations, 5 Refs.

The faulty behaviour of the independent electronic overcurrent time protection is influenced essentially through the transformer input circuit, the transmission behaviour of which during operating current and short-circuit current areas is studied. The results point out, that protective current transformers have not necessarily to correspond to the high demands, made in general, because these may not be fulfilled simultaneously by the protective devices input transformers.

Bunzel, E.; Hauptmann, M.; Kunckel, K.-H.; Paulig, E.; Schubert, P.: **Selected Problems in Measuring Electric Machines**

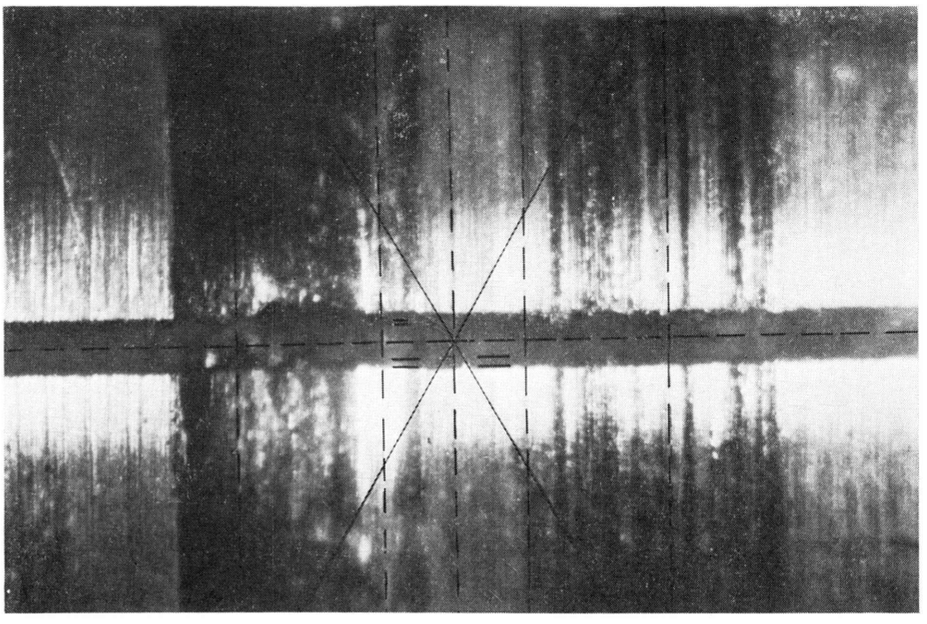
ELEKTRIE, Berlin 38 (1984) 6, pp. 227 – 230, 8 Figs., 1 Table, 5 Equations, 8 Refs.

A possibiliy of the torque measurement by means of electric quantities, the measurement of magnetic field quantities of rotating electric machines, the quantitative determination of the brush fire intensity of commutating machines, and the wear determination of the brush,commutator unit of d.c. miniature machines are represented.

Herausgeber	Kammer der Technik
Verlag	VEB Verlag Technik DDR-1020 Berlin, Oranienburger Str. 13/14, PSF 201 Telegrammadresse: Technikverlag Berlin Telefon: 2870 0; Telex: 011 2228 techn dd
Verlagsdirektor	Dipl. oec. *Herbert Sandig*
Redaktion	Dipl.-Ing. *Klaus Heide*, Verantwortlicher Redakteur (Telefon: 2870345) Dipl.-Ing. *Wolfgang Rönspieß*, Redakteur (Telefon: 2870343)
Lizenz-Nr.	1100 des Presseamtes beim Vorsitzenden des Ministerrates der Deutschen Demokratischen Republik
AN (EDV)	6730
Erscheinungsweise	monatlich 1 Heft
Heftpreis	2,50 M, Abonnementpreis vierteljährlich 7,50 M. Auslandpreise sind den Zeitschriftenkatalogen des Außenhandelsbetriebes BUCHEXPORT zu entnehmen.
Gesamtherstellung	III/18/328 Messedruck Leipzig, BT Borsdorf 7122 Borsdorf
Anzeigenannahme	Für Bevölkerungsanzeigen alle Anzeigen-Annahmestellen in der DDR, für Wirtschaftsanzeigen der VEB Verlag Technik, 1020 Berlin, Oranienburger Str. 13/14, PSF 201 Anzeigenpreisliste Nr. 7 Auslandsanzeigen: Interwerbung GmbH, DDR-1157, Berlin, Hermann-Duncker-Str. 89
Erfüllungsort und Gerichtsstand	Berlin-Mitte. Der Verlag behält sich alle Rechte an den von ihm veröffentlichten Aufsätzen und Abbildungen, auch das der Übersetzung in fremde Sprachen, vor. Auszüge, Referate und Besprechungen sind nur mit voller Quellenangabe zulässig.
Bezugsmöglichkeiten	
DDR	sämtliche Postämter
SVR Albanien	Direktorije Quendrore e Perhapjes dhe Propaganditit te Librit Rruga Konference e Pezes, Tirana
VR Bulgarien	Direkzia R.E.P., 11a, Rue Paris, Sofia
VR China	China National Publications Import and Export Corporation, West Europe Department, P.O. Box 88 Beijing
ČSSR	PNS – Ústrédni Expedicia a Dovoz Tisku Praha, Vinohardská 41, 125 05 Praha PNS, Ústred na Expedicia Tiače, Gottwaldovo nám. 48, 88419 Bratislava
SFR Jugoslawien	Jugoslovenska Knjiiga, Terazije 27, Beograd; Izdavačko Knjižarsko Produzeće MLADOST, Ilica 30, Zagreb
Koreanische DVR	CHULPANMUL Korea Publictions Export & Import Corporation, Pyongyang
Republik Kuba	Empresa de Comercio, Exterior de Publicaciones, O'Reilly No. 407, Ciudad Habana
VR Polen	C.K.P.i.W. Ruch, Towarowa 28, 00-958 Warszawa
SR Rumänien	Directia Generala a Postei si Difuzarii Presei, Palatul Administrativ, Bucuresti
UdSSR	Städtische Abteilungen von Sojuzpečat' oder Postämter und Postkontore
Ungarische VR	P.K.H.I., Külföldi Elöfizetési Osztály, P.O. Box 16, 1426 Budapest
SR Vietnam	XUNHASABA 32, Hai Ba Trung, Hanoi
BRD und Berlin (West)	ESKABE Kommissions-Grossobuchhandlung, Postfach 36, 8222 Ruhpolding/Obb.; Helios Literatur-Vertriebs-GmbH, Eichborndamm 141 – 167, Berlin (West) 52; Kunst und Wissen Erich Bieber OHG, Postfach 46, 7000 Stuttgart 1; Gebrüder Petermann, BUCH + ZEITUNG INTERNATIONAL, Kurfürstenstraße 111, Berlin (West) 30
Österreich	Helios Literatur-Vertriebs GmbH & Co. KG, Industriestraße B 13, A-2345 Brunn am Gebirge
Schweiz	Verlagsauslieferung Wissenschaft der Freihofer AG, Weinbergstr. 109, 8033 Zürich
Alle anderen Länder	örtlicher Fachbuchhandel BUCHEXPORT Volkseigener Außenhandelsbetrieb der Deutschen Demokratischen Republik, DDR-7010 Leipzig, Postfach 160; und Leipzig Book Service DDR-7010 Leipzig, Talstraße 29

Bild 7. Bürstenlaufspuren auf einem kleinen Kommutator

Das Foto zeigt 2 Laufspuren von Metallbürsten auf einem 13lamelligen Kommutator mit einem Durchmesser von 6,5 mm. In der Bildmitte, dargestellt ist etwa der Bereich einer Lamellenteilung, befindet sich ein Kommutatorschlitz.



Verschleißmessungen am Bürsten- und Kommutatorapparat von Gleichstromkleinstmaschinen

Fotos zum Fachaufsatz: Ausgewählte Probleme bei Messungen an elektrischen Maschinen von E. Bunzel, M. Hauptmann u.a. auf den Seiten 227 bis 230.

Beide Bilder wurden mit dem Zweikoordinatenmeßgerät ZKM 05-250 D bei unterschiedlicher Vergrößerung aufgenommen. Fotografiert wurde mit der Kamera PRACTICA LTL 2 mit Adapter und Zwischenringen bei abgenommenem Binokulartubus. Die Auflichtbeleuchtungseinrichtung war mit einer Halogenlichtwurflampe bestückt.

Fotos: TU Dresden

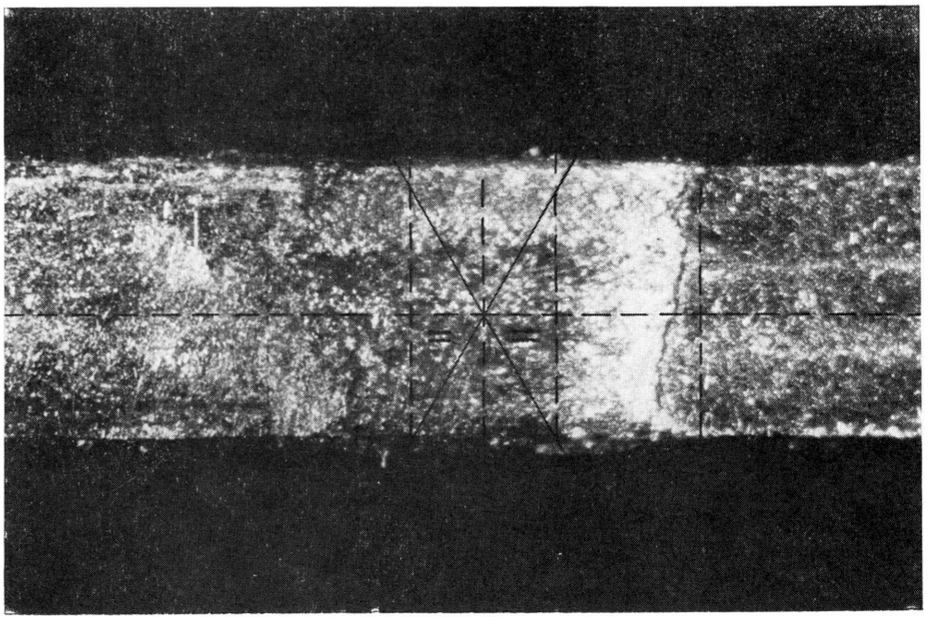


Bild 8. Verschleißspuren auf einer kleinen Edelmetallbürste

Deutlich erkennbar sind Verschleißspuren auf einer einfingrigen Metallbürste von 0,7 mm Breite.

ISSN 0013 — 5399
ELEKTRIE · Berlin 38 (1984) 6 · S. 201 — 240

6730 6 177 027 465
KOMB KERAM WERKE
8012 7001 0136 PF
485

NEUERSCHEINUNGEN

Physikalische Modellierung elektromagnetischer Felder und Prozesse in elektrischen Maschinen

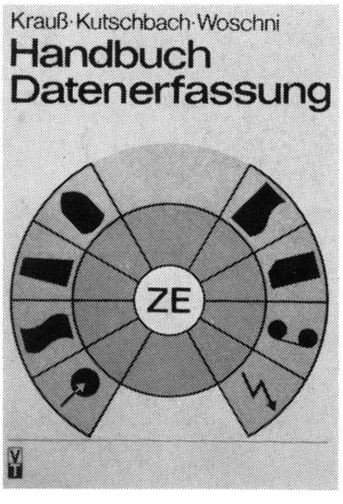
Von Prof. Dr. d. techn. Wiss. A. V. Ivanov-Smolenskij
und Dr.-Ing. Joachim Meye.
Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. habil. Germar Müller.
128 Seiten, 64 Bilder, 11 Tafeln, Broschur, 17,50 M.
Bestellangaben: 553211 5/Ivanov, Maschinen

In dieser Monografie werden die Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten der Methoden der physikalischen Modellierung zur Untersuchung elektromagnetischer Felder und Prozesse in elektrischen Maschinen beschrieben. Ausgehend von der allgemeinen mathematischen Beschreibung der elektromagnetischen Felder in elektrischen Maschinen sind die Ähnlichkeitsbedingungen abgeleitet. Es werden Arten physikalischer Modelle elektrischer Maschinen oder ihrer Elemente betrachtet, die die Wiedergabe der Prozesse im Original mit unterschiedlicher Annäherung gestatten. Weitere Anwendungsgebiete sind aufgezeigt. Anhand praktischer Beispiele wird die Nutzung der Methoden zur Berechnung, Konstruktion, Untersuchung sowie für Versuche an elektrischen Maschinen dargestellt.

Selbstorganisation von Vorhersagemodellen

Von Prof. Dr. d. techn. Wiss. A. G. Ivachnenko
und Doz. Dr. sc. oec. Johann-Adolf Müller.
272 Seiten, 72 Bilder, 44 Tafeln, Kunstleder, 36,— M.
Bestellangaben: 5533521/Ivachnenko, Vorhersage

Die Selbstorganisation mathematischer Modelle auf der EDVA stellt eine Entwicklung in Richtung einer rechnergestützten Modellbildung dar, die sich in der praktischen Anwendung für vielfältige Aufgabenstellungen erfolgreich bewährt hat und inzwischen international angewendet und weiterentwickelt wird. Die vorliegende Monografie will einen breiten Kreis von Lesern mit dieser wichtigen Entwicklungsrichtung der Modellbildung erstmalig bekannt machen. Sie wendet sich an die auf die Systemforschung orientierten Fachleute unterschiedlicher Disziplinen, wie z. B. Ingenieure, die Automatisierungsprojekte, technologische Prozesse und betriebliche Abläufe zu entwerfen und zu modellieren haben, Verfahrenstechniker, Mathematiker, Ökonomen, Ökologen, wie überhaupt an Spezialisten, die sich für die Ermittlung von Vorhersagen bei ungenügender A-priori-Information interessieren. Studenten dient das Buch zur Vertiefung ihrer Kenntnisse auf dem Gebiet der Kybernetik und Systemforschung.



Handbuch Datenerfassung

Von Prof. Dr.-Ing. habil. Manfred Krauß, Doz. Dr.-Ing. Ernst Kutschbach
und Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Eugen-Georg Woschni.
380 Seiten, 248 Bilder, 72 Tafeln, Leinen, 39,— M, Ausland 52,— M.
Bestellangaben: 5533441/Krauß, Datenerfassung

Das Handbuch behandelt alle wesentlichen Aspekte der Datenerfassung einschließlich der damit zusammenhängenden Verarbeitungsaufgaben. Im Mittelpunkt der Ausführungen stehen Organisation, Technik und Anwendung. Besonderer Wert wurde auf die Einbeziehung der Mikroelektronik und vor allem der Mikrorechentechnik gelegt.

Auslieferung
durch den Fachbuchhandel

VEB VERLAG TECHNIK BERLIN